GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – GDF
SECRETARIA DE ESTADO DE OBRAS

PROGRAMA DE SANEAMENTO BÁSICO NO DISTRITO FEDERAL

ACORDO DE EMPRÉSTIMO Nº 1288/OC-BR – BID

PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA DO DISTRITO FEDERAL

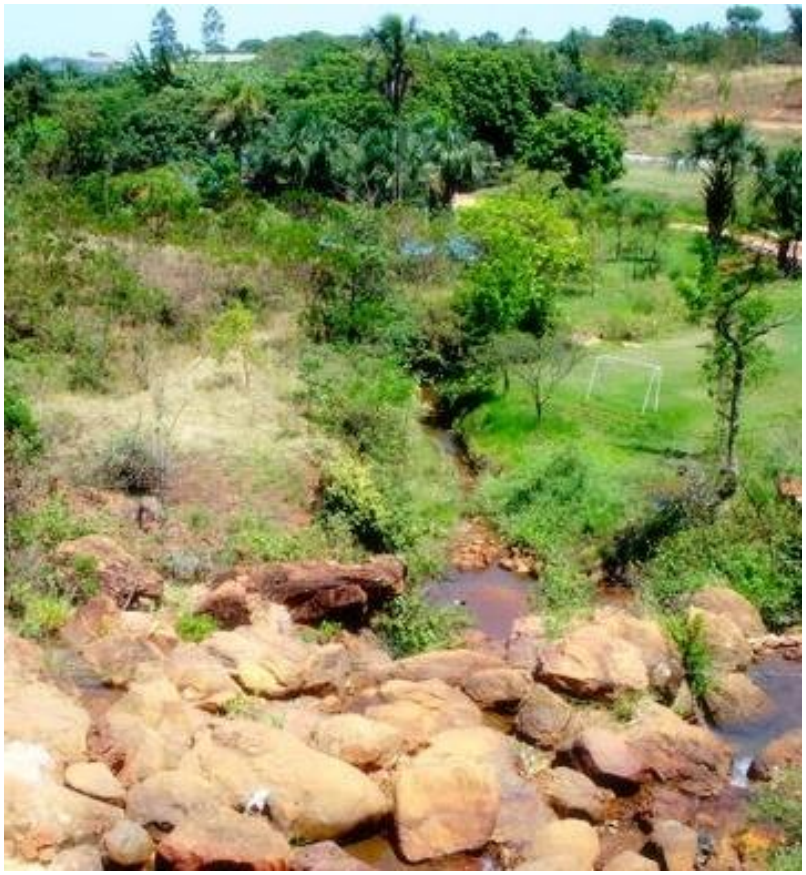
Volume 1 **Manual Técnico 1** Modelos hidrológico e hidráulico	CONCREMAT ENGENHARIA **Fevereiro / 2009**

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – GDF
SECRETARIA DE ESTADO DE OBRAS

PROGRAMA DE SANEAMENTO BÁSICO NO DISTRITO FEDERAL

ACORDO DE EMPRÉSTIMO Nº 1288/OC-BR – BID

PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA DO DISTRITO FEDERAL



Volume 1 **Manual Técnico 1** Modelos hidrológico e hidráulico	CONCREMAT ENGENHARIA **Fevereiro / 2009**

Ficha Catalográfica

Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras, Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal – 2009.

Brasília: Concremat Engenharia, 2009

V. 1

Conteúdo: 3 V

Manual Técnico 1 – Manual Técnico dos Modelos Hidrológico e Hidráulico

1. Manual Técnico. 2. Plano Diretor de Drenagem Urbana. 3. Distrito Federal.

I. Concremat Engenharia, II Secretaria de Estado de Obras. III. NOVACAP

CDU 556:711.4

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO ..... *III*

LISTA DE FIGURAS ..... *V*

LISTA DE QUADROS ..... *VI*

LISTA DE TABELAS ..... *VI*

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS ..... *VII*

1 MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA IPHS1 - FUNDAMENTOS *1*

1.1 Introdução **1**

1.2 Estrutura do Sistema Computacional **2**

1.3 Discretização da bacia **6**

1.4 Modelos do sistema – *Módulo bacia* **8**

1.4.1 Precipitação 8

1.4.2 Separação do escoamento 11

1.4.3 Escoamento superficial 26

1.4.4 Escoamento de base 34

1.5 Modelos do sistema – *Módulo rio* **35**

1.5.1 Escoamento em rios e canais 35

1.5.2 Escoamento em reservatório 43

1.5.3 Derivação 45

2 MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA IPHS1 - UTILIZAÇÃO *47*

2.1 Introdução **47**

2.2 Instalação do IPHS1 ..... **47**

2.2.1 Instalando o programa 47

2.2.2 Desinstalando o programa 48

2.3 Interface do IPHS1 ..... **48**

2.3.1 Janela principal 48

2.3.2 Opções da Barra de Menus 51

2.3.3 Opções da Barra de Ferramentas Principal 53

2.3.4 Opções da Barra de Ferramentas Hidrográficas 53

2.4 Operação do IPHS1 ..... **54**

2.4.1 Inicialização do programa 54

2.5 Criação, abertura, edição e fechamento de um projeto **55**

2.5.1 Criando e Salvando um novo Projeto 55

2.5.2 Abrindo, Editando e Fechando um Projeto Existente 63

2.6 Criação de Elementos de Operações Hidrológicas ou de uma Rede Hidrográfica **64**

2.6.1 Lançamento das Operações Hidrológicas sobre a Área de Projeto 65

2.7 O Gerenciador de Projeto **67**

2.8 Edição de Elementos do Módulo Bacia e do Módulo Rio **68**

2.8.1 Edição de Pontos de Controle (Módulo Rio) 69

2.8.2 Edição de Sub-bacias 70

2.8.3 Edição de Trechos de Água 79

2.8.4 Edição de Reservatórios 86
2.8.5 Substituição de PCs por Reservatórios e vice-versa 89

2.9 Clonagem e Cópia de Objetos 89

2.10 Execução da simulação 90
2.10.1 Diagnóstico Geral do Projeto 90
2.10.2 Execução do IPHS1 DOS 91

2.11 Análise dos resultados e documentação 93
2.11.1 Arquivo ASCII de Saída do IPHS1 93
2.11.2 Resultados em formato de planilhas e gráficos 94
2.11.3 Documentação do projeto 99

3 MODELO SWMM - STORM WATER MANAGEMENT MODEL 100

3.1 Introdução 100
3.1.1 Características do modelo hidrológico 101
3.1.2 Aplicações típicas do SWMM 103
3.1.3 Instalação do programa 104
3.1.4 Passos de utilização do modelo 105

3.2 Modelo conceitual utilizado pelo SWMM 105
3.2.1 Componentes físicos (*Visual Objects*) 107
3.2.2 Objetos virtuais (sem representação gráfica) 120
3.2.3 Métodos computacionais 124

4 EQUIPE TÉCNICA E DE APOIO 130

4.1 Governo do Distrito Federal – GDF 130

4.2 Secretaria de Estado de Obras 130

4.3 Equipe de coordenação e apoio da contratante 130

4.4 Concremat Engenharia 130

5 BIBLIOGRAFIA 132

APRESENTAÇÃO

Dentre os produtos do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal, objeto do contrato nº 037/08 firmado entre a Secretaria de Obras do DF e a Concremat Engenharia, encontram-se os Manuais Técnicos. A coleção de manuais, composta por três volumes, visa orientar projetistas e profissionais dos órgãos responsáveis pelo planejamento, implantação e gerenciamento dos sistemas de drenagem urbana.

Este Manual Técnico corresponde ao volume 1, o qual apresenta e detalha o funcionamento dos modelos hidrológicos e hidráulicos empregados nas simulações do sistema de drenagem realizadas no âmbito dos estudos para desenvolvimento do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal e, por isso, constitui-se em um complemento do Relatório de Produto 4.

Em um ambiente natural, a manutenção dos recursos hídricos, no que diz respeito ao regime de vazão dos cursos d'água e da qualidade de água, decorre de mecanismos naturais de controle desenvolvidos ao longo de processos evolutivos da paisagem. Um destes mecanismos, por exemplo, é a relação íntima que existe entre a cobertura e tipo de solo e a água, visto que a precipitação sobre a área de uma bacia, se não retorna a atmosfera por evapotranspiração, se distribui entre escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, em função destas características. Esta condição natural de equilíbrio dinâmico vem sendo constantemente alterada pelo homem através do desmatamento, expansão da agricultura, abertura de estradas, urbanização e vários outros processos de transformação antrópica da paisagem, que alteram o ciclo da água.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, os processos

que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso do solo sobre a quantidade (WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, através do equacionamento dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). Entretanto, é inviável ou impossível traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos, seja porque essas relações são extremamente complexas, a ponto de não existir uma formulação matemática capaz de descrevê-las completamente, ou porque o conhecimento dos processos envolvidos nessas relações é apenas parcial. Assim, na maioria dos casos, a modelagem hidrológica torna-se somente uma representação aproximada da realidade.

Da mesma forma, os modelos hidráulicos possibilitam uma representação de sistemas e redes de drenagem, naturais ou artificiais, permitindo compreender seu funcionamento frente a condições específicas.

Embora exista uma infinidade de modelos hidrológicos e hidráulicos, aplicáveis as mais diversas situações, foi selecionado para a utilização no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal um sistema computacional modulado denominado IPHS1, que abrange diversos algoritmos de utilização conhecida na hidrologia, e o modelo de simulação hidrológica-hidráulica SWMM – *Storm Water Management Model.* Além do critério de aplicabilidade, essa escolha também considerou a possibilidade de acesso a estes modelos de forma gratuita pelo público-alvo.

O presente Manual Técnico não tem a pretensão de substituir os manuais originais dos respectivos modelos. Tem como objetivo dar subsídios para a utilização dos modelos dentro do escopo deste Plano Diretor.

Celso Queiroz

Coordenador

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de discretização: bacia do rio Paranhana, no RS. 7
Figura 1.2. Hietograma de projeto dos blocos alternados. 10
Figura 1.3. Fluxograma de cálculo do modelo IPH II (MINE, 1998). 12
Figura 1.4. Reservatório de intercepção (MINE, 1998). 13
Figura 1.5. Continuidade na camada superior do solo (MINE, 1998). 14
Figura 1.6. Funções do algoritmo de infiltração (TUCCI, 1979). 15
Figura 1.7. Situações contempladas no algoritmo de infiltração (MINE, 1998). 16
Figura 1.8. Função geral de avaliação de perdas. (HEC, 1974) 20
Figura 1.9. Representação do índice Ø. 25
Figura 1.10. Método de Clark (MINE, 1998). 27
Figura 1.11. Isócronas e histograma tempo-área (PORTO, 1995). 27
Figura 1.12. Forma do histograma tempo-área para diferentes valores do parâmetro *n* (HEC, 1974). 29
Figura 1.13. Hidrograma unitário adimensional (HYMO, 1972). 31
Figura 1.14. Hidrograma unitário triangular do SCS. 33
Figura 1.15. Relação entre X e K/Δt (JONES, 1981). 38
Figura 1.16. Malha de cálculo. 39
Figura 1.17. Seção transversal composta (MILLER & CUNGE, 1975). 40
Figura 2.1. Tela principal do IPHS1. 49
Figura 2.2. Elementos da interface na tela principal do IPHS1. 50
Figura 2.3. Área de projeto. 55
Figura 2.4. Janela de diálogo “Salvar projeto como ...”. 56
Figura 2.5. Arquivo de Projeto aberto no Editor de Textos do IPHS1. 57
Figura 2.6. Janela de Dados do Projeto. 58
Figura 2.7. Entrada de dados dos postos de chuva. 62
Figura 2.8. Seleção dos tipos de dados de chuva. 63
Figura 2.9. Lançamentos de elementos representativos de Operações Hidrológicas na Área de Projeto. 67
Figura 2.10. Janela "Dados de um PC". 69
Figura 2.11. Janela "Dados de uma sub-bacia". 70
Figura 2.12. Janela "Transformação Chuva-vazão". 71
Figura 2.13. Janela para o cálculo do tempo de concentração por Kirpich. 72
Figura 2.14. Ordem da chuva segundo Método dos blocos alternados. 73
Figura 2.15. Janela do Método IPHII. 73
Figura 2.16. Janela de Cálculo do CN. 74
Figura 2.17. Janela para se Adicionar Dados. 75
Figura 2.18. Janela do Método HEC1. 76
Figura 2.19. Janela do Método FI. 76
Figura 2.20. Janela do Método Holtan. 77
Figura 2.21. Janela do Método HU observado. 77
Figura 2.22. Janela do Método HYMO (Nash Modificado). 78
Figura 2.23. Janela do Método de Clark. 79
Figura 2.24. Janela da Propagação em Rio. 80

Figura 2.25. Janela da Propagação Método de Muskingum. 81
Figura 2.26. Janela da Propagação Método de Muskingum-Cunge Linear. 82
Figura 2.27. Janela da Propagação Método de Muskingum-Cunge Não-Linear. 83
Figura 2.28. Janela de Propagação Método de Muskingum-Cunge com planície de inundação. 84
Figura 2.29. Janela de Propagação Método de Muskingum-Cunge Não-Linear em condutos fechados. 86
Figura 2.30. Janela para edição de dados de um Reservatório. 87
Figura 2.31. Janela de dados do vertedor. 88
Figura 2.32. Janela de dados do orifício. 88
Figura 2.33. Janela de edição das estruturas extravasoras. 89
Figura 2.34. Menu de acesso às opções Clonar objeto e Copiar Dados. 90
Figura 2.35. Janela indicativa de diagnóstico insatisfatório. 91
Figura 2.36. Janela de execução do IPHS1 DOS. 92
Figura 2.37. Janela de execução do IPHS1 DOS. 93
Figura 2.38. Menu de acesso aos resultados em planilhas e gráficos. 94
Figura 2.39. Gráficos e Planilhas das sub-bacias. 96
Figura 2.40. Hidrograma dos objetos conectados. 97
Figura 2.41. Hidrograma resultante. 98
Figura 2.42. Acesso à graficação e apresentação em planilhas dos resultados de quaisquer operações hidrológicas selecionadas pelo usuário. 99
Figura 3.1. Exemplo dos componentes físicos empregados na modelagem de um sistema de drenagem. 107
Figura 3.2. Hidrograma unitário de geração de RDII. 121
Figura 3.3. Exemplo de seção transversal de um canal natural. 122
Figura 3.4. Visão conceitual do escoamento no SWMM. 125

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Diferentes seções transversais de condutos disponíveis. 114
Quadro 3.2. Diferentes tipos de vertedores disponíveis. 119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Sequência de cálculo e descrição das operações hidrológicas 8
Tabela 1.2. Parâmetros da equação de Horton (FITCH *et al.*, 1976) 18
Tabela 1.3. Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas 23
Tabela 1.4. Valores do parâmetro CN para bacias rurais 23
Tabela 1.5. Correção do CN em função da umidade antecedente 24
Tabela 2.1. Funções dos elementos representativos das Operações Hidrológicas 65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
USEPA	*United States Environmental Protection Agency*
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GDF	Governo do Distrito Federal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS
NBR	Norma Brasileira
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
PC	Sigla em Inglês para Computador Pessoal (*Personal Computer*)
PDDU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
SCS	*Soil Conservation Service*
S.I.	Sistema Internacional de unidades
SWMM	*Storm Water Management Model*
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA IPHS1 - FUNDAMENTOS

1.1 Introdução

Para solucionar diferentes tipos de problemas na área de engenharia de recursos hídricos é necessário avaliar o hidrograma de projeto resultante da ocorrência de uma ou várias tormentas sobre uma bacia hidrográfica. O hidrograma de projeto é uma das técnicas hidrológicas que compõem a vazão e o volume máximo de uma enchente. O hidrograma é obtido com base na precipitação máxima ocorrida sobre uma bacia ou a partir de uma precipitação referenciada a um determinado risco e transformadas em vazão através de um modelo hidrológico.

Neste capítulo é apresentado um *sistema computacional modulado,* denominado IPHS1, o qual permite ao usuário a determinação do hidrograma de projeto através da escolha da combinação de alguns algoritmos existentes na literatura e de utilização consagrada, desta forma compondo seu próprio modelo. A modulação é didática, pois permite ao usuário diferentes combinações e sua consequente comparação e entendimento do sistema representado. Também permite a escolha mais adequada do modelo que melhor represente as diferentes realidades existentes nos sistemas naturais.

O modelo permite representar a discretização do sistema em dois módulos básicos: Bacia e Rio. Sua característica modular permite a subdivisão da bacia em um grande número de sub-bacias, incluindo-se barragens e sua operação.

Os algoritmos do sistema foram extensamente testados. No entanto, devem ser utilizados criteriosamente para sistemas singulares, respeitando os limites de aplicabilidade de cada um dos algoritmos. Por exemplo, o modelo Muskingum, em suas diferentes versões, não pode ser utilizado para a simulação de escoamento em

rios sujeitos a inversão de vazão ou a efeitos de jusante. É fundamental que o usuário tenha em mente que um projeto é obra de um engenheiro ou profissional habilitado para tal e nunca de um programa computacional. Este é apenas uma ferramenta que, bem utilizada, poupa tempo e amplia o horizonte de análise.

Na sequência deste capítulo é descrita a estrutura do sistema computacional, permitindo uma visão de conjunto.

1.2 Estrutura do Sistema Computacional

O hidrograma de projeto é determinado através do conhecimento da precipitação de projeto, das características físicas das bacias e dos parâmetros do modelo de transformação da precipitação em vazão.

As diferentes fases do processo de transformação de precipitação em vazão são modeladas por algoritmos matemáticos. Na literatura, são apresentados diferentes algoritmos que compostos, identificam modelos tais como HEC-1, SSARR, IPH-II, STANFORD IV e HYMO, entre outros.

Este sistema não tem a pretensão de ser mais um modelo hidrológico, mas de permitir ao usuário escolher, para cada fase do processo precipitação-vazão, um algoritmo e compor seu próprio modelo.

A estrutura modular do sistema IPHS1 tem como objetivo:

(a) melhor compreensão dos processos hidrológicos e dos algoritmos clássicos utilizados para sua simulação;

(b) ensino de modelos matemáticos;

(c) oferecer alternativas de escolha do melhor conjunto de algoritmos para uma bacia específica.

O sistema de modelação pode ser obtido em versão *Windows* para PC, ou em versão em *Fortran*. No primeiro caso, a entrada de dados se dá em forma amigável,

mediante telas explicativas programadas em *Delphi*, permitindo uma fácil interação do usuário com o modelo. Os algoritmos de cálculo e a saída do modelo (resultados da simulação) foram programados em *Fortran* devido à versatilidade para programação de complicados algoritmos.

É recomendada aos usuários em geral o uso da interface *Windows* e, para programadores, existe a possibilidade de acesso às rotinas-fonte, que permitirão adaptar o sistema de modulação a requerimentos específicos.

Internamente o sistema está modulado de acordo com as "operações hidrológicas", oferecendo as seguintes opções:

- Escoamento em rios;
- Propagação em reservatório;
- Transformação precipitação-vazão na bacia;
- Entrada, soma ou derivação de hidrogramas.

Para cada uma destas opções são fornecidas as características físicas e os dados históricos. Estas operações hidrológicas são acopladas segundo a numeração sequencial informada pelo usuário na versão Fortran. Cada número identifica o hidrograma resultante no final da bacia ou trecho. Na versão Windows a partir de dados obtidos das distintas telas do programa, a interface realiza automaticamente o acoplamento das operações hidrológicas no arquivo de entrada.

O sistema computacional é formado por três componentes, seguindo um esquema clássico de programação:

Leitura e escrita de dados: A interface *Windows* realiza a leitura e escrita de dados em arquivos de entrada específicos do modelo. Para facilitar a entrada de dados, a interface dispõe de bases de dados de valores dos distintos parâmetros das metodologias de simulação, para distintas situações, podendo ser escolhido o parâmetro em função da informação contida na própria base de dados ou fornecida pelo usuário.

Modelos: Os modelos constituem os algoritmos de cálculo. Eles estão programados em *Fortran*, devido à simplicidade da linguagem para elaboração de algoritmos complexos. Para o usuário *Windows* o contato com o modelo em si se limita a execução do mesmo a partir da chamada na tela principal.

Saída gráfica: Tem por finalidade apresentar os dados utilizados e os resultados numéricos e gráficos, quando solicitados. Esta é realizada dentro da própria interface *Windows*, podendo ser os gráficos exportados para planilhas eletrônicas (ex. *Excel*) ou processadores de texto (ex. *Word*). Na saída do modelo na interface *Windows* está incluída a saída original do *Kernell Fortran* (núcleo de cálculo) que, embora com menor detalhamento gráfico, possui maiores informações sobre a simulação (valores de parâmetros, singularidades da simulação, etc.) permitindo realizar uma análise mais detalhada de singularidades da simulação.

Os modelos incluídos dentro do sistema computacional IPHS1 são mais facilmente entendidos quando divididos em dois módulos: *módulo bacia* e *módulo rio*.

Cada módulo está formado por submódulos que realizam operações hidrológicas específicas. Por sua vez cada submódulo apresenta como opções diferentes algoritmos de cálculo.

O *módulo bacia* tem a seguinte configuração:

Precipitação:

- Precipitação sequencial fornecida pelo usuário;
- Precipitação acumulada de projeto, obtida de relações IDF.

Separação de escoamento:

- Algoritmo de Horton modificado;
- Equação de Holtan;
- Método Exponencial (HEC-I);
- Método de relações funcionais ou da curva número (SCS);

- Índice Ø.

Escoamento superficial:

- Método de Clark;
- Hidrograma unitário fornecido;
- Hidrograma unitário triangular do *SCS*;
- Método de Nash modificado (HYMO).

Escoamento subterrâneo:

- Reservatório linear simples.

O *módulo rio* é dividido em três partes:

- Escoamento em rios;
- Escoamento em reservatório;
- Derivação de vazões.

Para o escoamento em rios propriamente existem as seguintes opções:

- Modelo Muskingum;
- Modelo Muskingum-Cunge linear ou não-linear;
- Modelo Muskingum-Cunge não-linear com planície de inundação;
- Modelo Muskingum-Cunge não-linear adaptado especificamente para condutos fechados.

Para o escoamento em reservatório é utilizado o método de *Puls* oferecendo como opções: fornecimento das características das estruturas de saída da água (vertedores, orifícios) ou diretamente a vazão de saída, operação de comportas, operação de um *by-pass* que permita a simulação de reservatórios do tipo *off-line*.

Para a derivação de vazões o sistema oferece um algoritmo para simular a separação de fluxo ou divergência produzida por um canal de derivação sem estrutura

de controle, neste caso a derivação pode ser diretamente em função das características dos canais, ou mediante uma percentagem fixa.

No item a seguir são apresentados alguns critérios para discretizar a bacia hidrográfica.

1.3 Discretização da bacia

Para determinar o hidrograma de projeto de uma pequena bacia, basta a utilização do *módulo bacia* do sistema, já que não é necessário discretizar a bacia em sub-bacias se as características das precipitações são uniformes. Para bacias maiores, onde existem não-uniformidades espaciais, reservatórios, modificações do leito e áreas de inundação, é necessária a subdivisão da bacia hidrográfica, procedimento chamado de discretização.

Para discretizar (subdividir) uma bacia hidrográfica com o objetivo de determinar o hidrograma de projeto, devem ser considerados fatores tais como: características hidrológicas e morfológicas homogêneas, localização de pontos de interesse, distribuição espacial da precipitação, existência de barramentos, entre outros.

O modelo possibilita que o estudo seja iniciado em qualquer parte da bacia e aplicado a qualquer área, desde que o escoamento seja unidirecional.

A fim de ilustrar a discretização de uma bacia, é apresentada na Figura 1.1 a bacia do rio Paranhana, localizada no Rio Grande do Sul. A bacia foi subdividida em cinco sub-bacias, três das quais aportam pontualmente (SB1, SB2 e SB4) e as duas restantes aportam ao curso d'água principal de forma distribuída (SB3 e SB5).

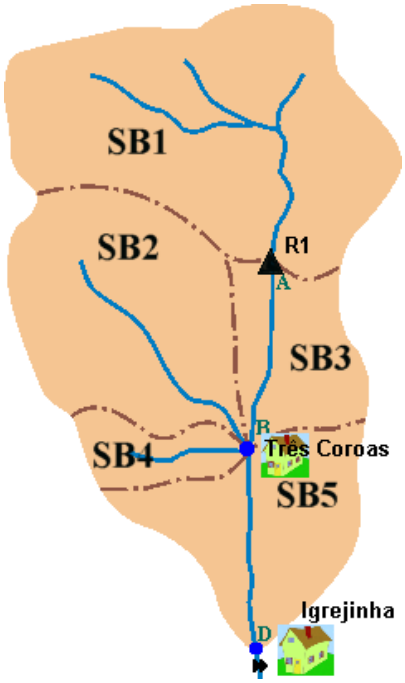


Figura 1.1. Exemplo de discretização: bacia do rio Paranhana, no RS.

São considerados dois trechos de propagação (A-B e B-D) e uma barragem (R1); o segundo trecho (B-D) apresenta problemas de extravasamento da calha principal.

A sub-bacia SB1 aporta de forma pontual no reservatório, o qual, por sua vez, faz o mesmo no primeiro trecho de propagação (A-B). Neste trecho aporta a sub-bacia SB3 de forma distribuída. O hidrograma ao final do trecho é somado aos resultantes das sub-bacias SB2 e SB4, obtendo-se o hidrograma de montante do trecho (B-D). A este trecho aporta em forma distribuída a sub-bacia SB5. Como elemento final do sistema hidrológico existe uma derivação em um canal de tomada de água.

O *arquivo de entrada* dos dados da bacia apresenta uma organização sequencial interna. Cada operação hidrológica produz um hidrograma calculado que é identificado por um número. Na Tabela 1.1 é apresentada a sequência de cálculo, a descrição das operações hidrológicas e a identificação dos hidrogramas resultantes de cada uma delas para o exemplo da Figura 1.1.

Na versão *Windows*, a entrada de dados é iniciada com a montagem gráfica da rede, e fornecimento de detalhes gerais do projeto. Posteriormente são ingressadas as características de cada elemento mediante *clicks* com o *mouse*. O arquivo de entrada com a organização das operações hidrológicas é gerado automaticamente pela interface, sendo oculto ao usuário.

Os hidrogramas e hietogramas estão dimensionados para um máximo de 600 ordenadas. O modelo permite armazenar um máximo de 200 hidrogramas simultâneos.

Tabela 1.1. Sequência de cálculo e descrição das operações hidrológicas

Hidrograma (Hid)	Operação Hidrológica	Elemento da Bacia	Dados de entrada
1	P-Q	SUB1	P
2	Prop. reservatório	R1	Hid 1
3	P-Q	SUB3	P
4	Prop. Rio	T(A-B)	Hid2+Hid3(d)
5	P-Q	SUB2	P
6	P-Q	SUB4	P
7	Soma hid.	C	Hid4+Hid5+Hid6
8	P-Q	SUB5	P
9	Prop. Rio	T(C-D)	Hid7+Hid8 (d)
10	Der	E	Hid9

1.4 Modelos do sistema – *Módulo bacia*

Este módulo compreende modelos que representam o processo de transformação chuva-vazão (P-Q) em cada uma das sub-bacias em que é discretizada a bacia total.

1.4.1 Precipitação

O algoritmo de precipitação tem por finalidade calcular o hietograma de cada sub-bacia. Existem duas possibilidades: *hietograma de projeto* ou *hietograma observado*.

Os hietogramas, um para cada posto de chuva, são ingressados respeitando uma ordem de numeração crescente entre 1 e N (não necessário na versão *Windows*), sendo N no máximo 10.

O algoritmo calcula a precipitação média para cada sub-bacia segundo o método dos polígonos de *Thiessen*. Para cada transformação P-Q são indicados quais postos de chuva participam e com que porcentagem (em função de *Thiessen*). Se existe um único posto, se ingressa o mesmo com porcentagem de 100%.

Para obter um *hietograma de projeto* é possível:

(1) Ingressar a precipitação com uma determinada ordenação definida pelo usuário,
(2) Ingressar os valores de precipitação acumulada para cada intervalo de tempo, extraídas das curvas intensidade-duração-frequência (IDF);
(3) Utilizar uma das curvas IDF armazenadas na base de dados do programa.

Na alternativa (1), a tormenta ingressada é diretamente aplicada na sub-bacia para separar escoamento e gerar o hidrograma de escoamento superficial. Nas alternativas (2 e 3), entretanto, o algoritmo desagrega as precipitações de projeto acumuladas e permite reordenar a tormenta de projeto segundo o critério do dos blocos alternados (Figura 1.2).

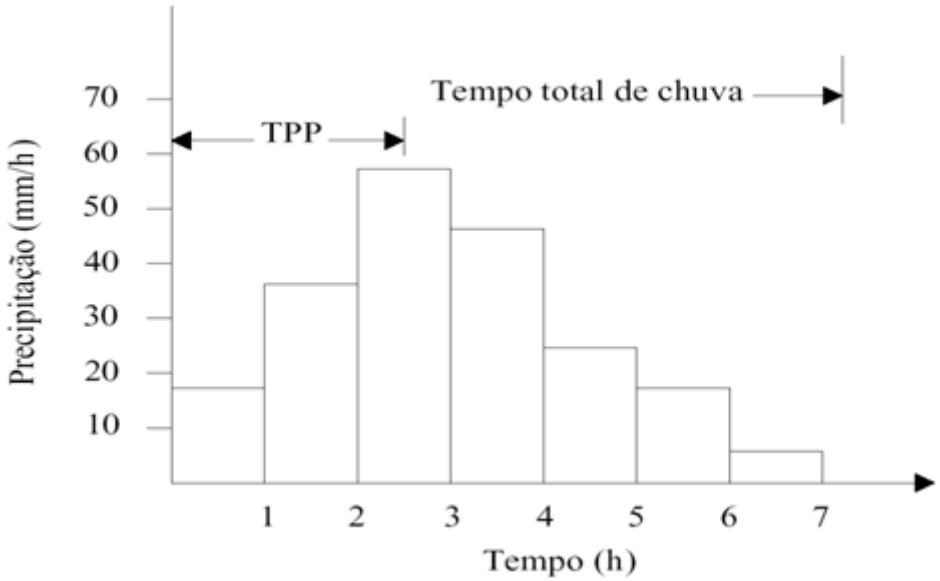


Figura 1.2. Hietograma de projeto dos blocos alternados.

No método dos blocos alternados são calculadas, com base nas relações IDF, as intensidades médias para diversas durações até a duração total. Essas intensidades são então transformadas em alturas de chuva e representam os valores acumulados até o último intervalo. Os incrementos entre um valor acumulado e outro são rearranjados, de forma que o maior valor se localize em, um período escolhido pelo usuário, entre 25, 50 ou 75% da duração da precipitação, no caso de utilizar o método dos blocos alternados, e no quarto quartil, segundo a metodologia do *Bureau of Reclamation*. Os demais incrementos são dispostos em ordem decrescente, sempre um à esquerda e outro à direita do máximo valor.

Para a possibilidade de utilização de um *hietograma observado*, é necessário fornecer, para cada sub-bacia, os números dos postos correspondentes e seu coeficiente de *Thiessen*. Com esta informação, o modelo calcula a precipitação média ponderada em cada intervalo de tempo para cada sub-bacia.

1.4.2 Separação do escoamento

A separação da parcela de chuva efetiva a ser utilizada para a determinação do hidrograma de escoamento superficial (escoamento direto) pode ser realizada mediante o uso de qualquer dos seguintes algoritmos:

- Modelo IPH II - *Horton* modificado;
- Exponencial do HEC;
- Curva número do *SCS* (ou das relações funcionais);
- Índice Ø;
- *Holtan*.

Modelo IPH II (Método de Horton modificado)

A base principal do modelo IPH II é um algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot (1970). O autor utiliza a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton (1937) e uma função empírica de percolação.

Berthelot *et. al.* (1972), Sanchez (1972) e Muñoz e Tucci (1974) utilizaram este algoritmo para compor um modelo precipitação, tendo sido aplicado com bons resultados em diversas bacias brasileiras.

O IPH II é composto pelos seguintes algoritmos:

a) Perdas por evaporação e intercepção;

b) Separação do escoamento;

c) Propagação dos escoamento superficial e subterrâneo (pelo método de Clark – será visto mais a frente).

Na Figura 1.3 é possível observar o fluxograma do modelo que representa o processo de cálculo em um intervalo de tempo.

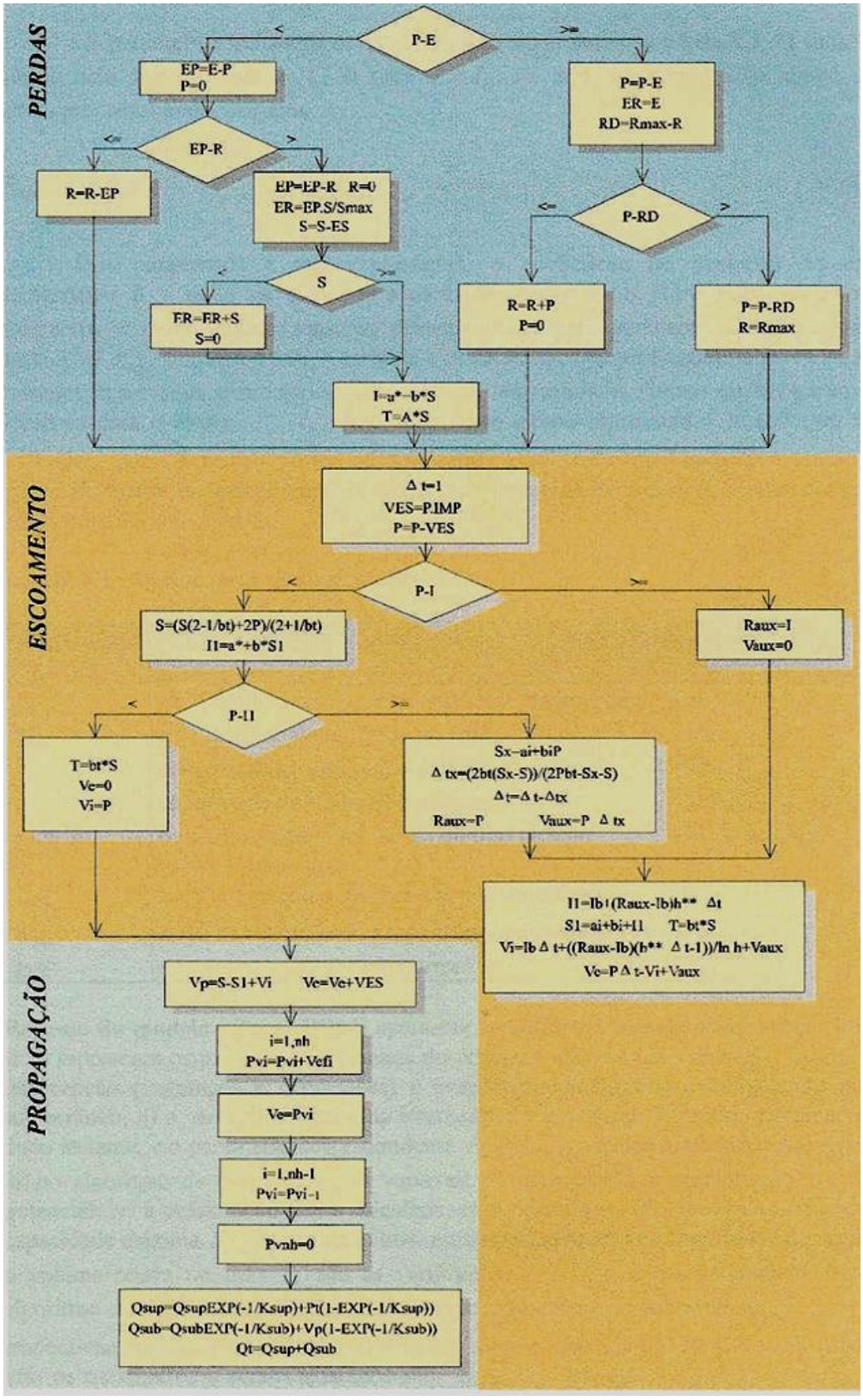


Figura 1.3. Fluxograma de cálculo do modelo IPH II (MINE, 1998).

a) Perdas por evaporação e intercepção

Como o sistema de modelação IPHS1 é orientado a eventos, não se inclui dentro do modelo IPH II o algoritmo de tratamento da evaporação, visto que esta resulta em parcela desprezível para eventos de curta duração.

A precipitação é inicialmente retida pelo reservatório de intercepção (cobertura vegetal e depressões) até que sua capacidade máxima $R_{máx}$ seja satisfeita (Figura 1.4). A precipitação restante é utilizada no algoritmo de infiltração para o cálculo dos volumes superficial e percolado.

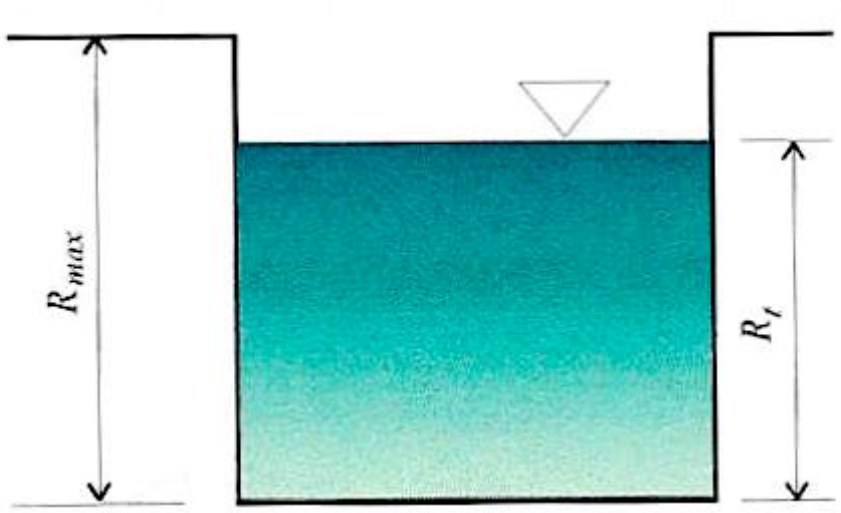


Figura 1.4. Reservatório de intercepção (MINE, 1998).

Uma parte da precipitação resultante, devido às áreas impermeáveis, é escoada apenas superficialmente, sem passar pelo algoritmo de infiltração. O parâmetro utilizado para definir a porcentagem de área impermeável na bacia é representado por IMP.

b) Separação do escoamento

A versão utilizada no modelo, a seguir descrita, é uma simplificação do algoritmo apresentado por Tucci (1979). A equação de Horton para a determinação da capacidade de infiltração é (Equação 1.1):

$$I = I_b + (I_o - I_b).h^t \quad (1.1)$$

Onde I é a capacidade de infiltração no tempo t, I_b a capacidade de infiltração mínima, I_0 a capacidade de infiltração para t=0 e h = exp(-K), onde K é um parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo. A percolação da camada superior do solo é definida pela Equação 1.2:

$$T = I_b.(1 - h^t) \quad (1.2)$$

A equação de continuidade aplicada à zona superior do solo, conforme Figura 1.5, é expressa por (Equação 1.3):

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (1.3)$$

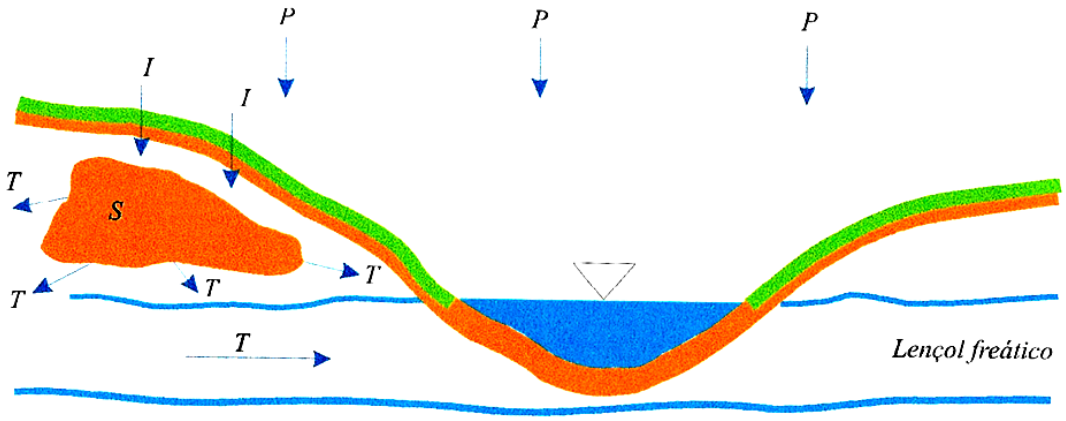


Figura 1.5. Continuidade na camada superior do solo (MINE, 1998).

Substituindo-se as equações (1.1) e (1.2) na equação (1.3) e integrando resulta:

$$S = S_o + \left(\frac{I_o}{I nh}\right).(h^t - 1) \quad (1.4)$$

Onde S_o é o estado da umidade de solo quando se inicia a percolação; e I_o a capacidade de infiltração correspondente.

Isolando-se o termo h^t nas equações (1.1) e (1.2) e substituindo-o na equação (1.4), resultam as seguintes equações, (Figura 1.6):

$$S = a_i + b_i.I \quad (1.5)$$

$$S = a_t + b_t.T \quad (1.6)$$

Onde: $a_i = \frac{\left(-I_o^{\,2}\right)}{\left[Inh.\left(I_o - I_b\right)\right]}$, $b_i = \frac{I_o}{\left[Inh\left(I_o - I_b\right)\right]}$, $a_t = 0$ e $b_t = \frac{\left(-I_o\right)}{\left(Inh.I_b\right)}$.

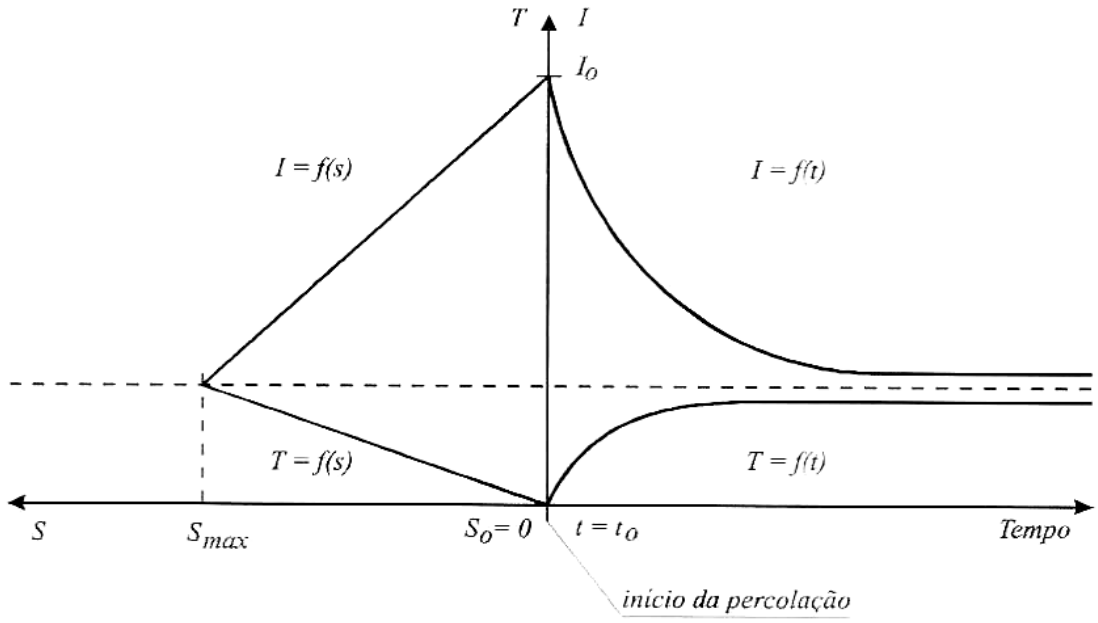


Figura 1.6. Funções do algoritmo de infiltração (TUCCI, 1979).

Duas situações podem ocorrer no cálculo dos volumes superficial e percolado:

1) A precipitação é maior que a capacidade de infiltração It (Figura 1.7a). Neste caso, são calculados I(t+1) pela equação (1.1), S(t+1), pela equação (1.5) e T(t+1), pela equação (1.6). Os volumes superficial e percolado são, então, determinados pelas equações (1.7) e (1.8), obtidas, respectivamente, da diferença entre o volume precipitado e infiltrado, este último resultante da integração da equação de Horton, e da integração da equação (1.2).

$$Ve = \left(p - I_b\right).\Delta^t - \left(I_t - I_b\right).\frac{\left(h^t - 1\right)}{Inh} \quad (1.7)$$

$$Vp = I_b.\Delta^t + \frac{\left(T_{t+1} - T_t\right)}{Inh} \quad (1.8)$$

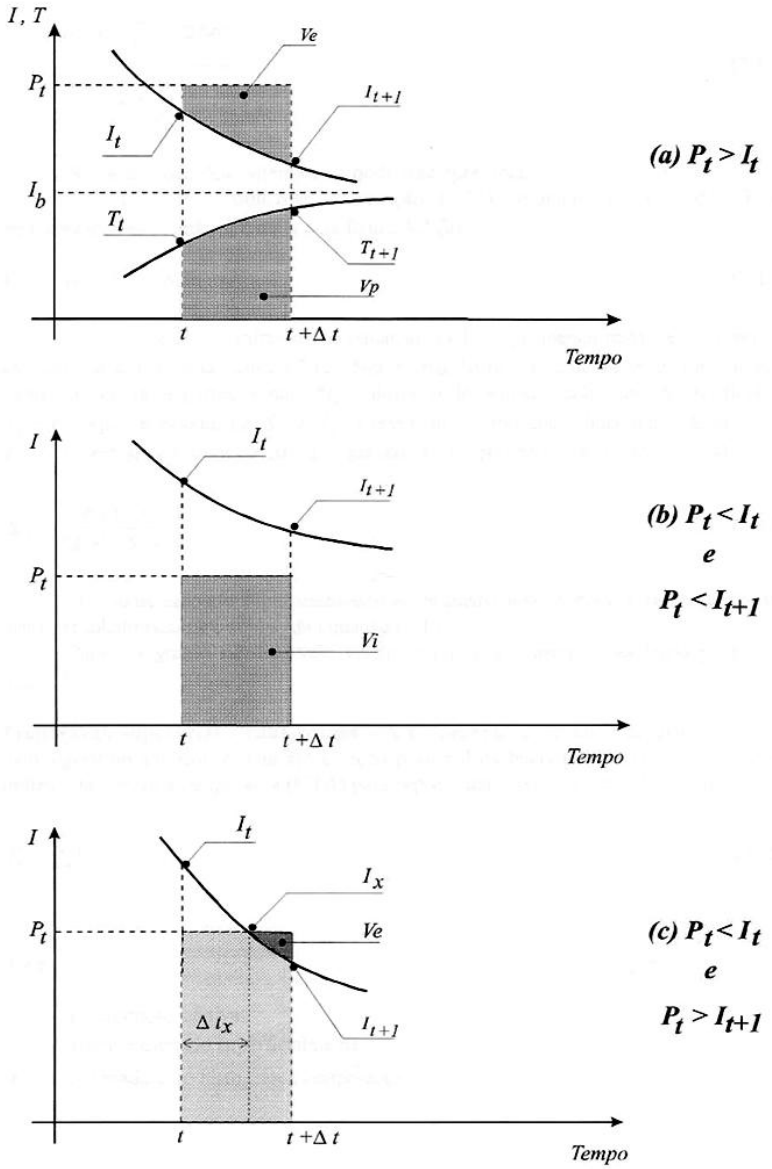


Figura 1.7. Situações contempladas no algoritmo de infiltração (MINE, 1998).

2) A precipitação é menor do que a capacidade de infiltração It (Figura 1.7b). Neste caso, o cálculo da capacidade de infiltração no fim do período é feito utilizando a equação (1.5). Para isso, no entanto, utiliza-se, previamente, a equação (1.10), oriunda da resolução do sistema formado pelas equações (1.6) e (1.9).

$$S_{t+1} = S_t + P.\Delta t - \left(T_{t+1} + T_t\right).\frac{\Delta t}{2} \qquad (1.9)$$

$$S_{t+1} = \frac{\left[S_t \cdot \left(\frac{2 - \Delta t}{b_t} \right) + 2.\Delta t.P \right]}{\left(\frac{2 + \Delta t}{b_t} \right)} \quad (1.10)$$

Nesta situação, duas alternativas podem apresentar-se: It+1 > P, utiliza-se neste caso a equação (1.11), resultante da equação (1.9); ou It+1<P (Figura 1.7c) quando se utiliza a equação (1.8).

$$Vp = P.\Delta t - S_{t+1} + S_t \quad (1.11)$$

A última situação mencionada exigirá, porém, a divisão do intervalo t em duas partes, sendo tx a duração do primeiro subintervalo, no final do qual Ix = p. Após o cálculo de Sx e Tx, através do mesmo caminhamento seguido no caso de It+1>P, extrai-se o valor de tx da equação (1.9), obtendo-se a equação (1.12).

$$\Delta tx = \frac{2.b_t.(S_x - S_t)}{(2.b_t.P - S_x - S_t)} \quad (1.12)$$

O volume escoado superficialmente no primeiro subintervalo será, portanto, nulo e o valor percolado resultará do uso da equação (1.11).

Para o segundo subintervalo valem as mesmas considerações feitas para o caso de It+1 < P.

Os valores I_o, I_b e K são parâmetros do método. A condição inicial do estado do reservatório de umidade do solo é definida em função da vazão base (Q_o).

$$S_t = Q_o.\left(b_t + \Delta t/2\right) \quad (1.13)$$

Esta expressão supõe um estado de equilíbrio das vazões de base no início da simulação, limitando o uso do método a essa situação na bacia. Fitch *et al.* (1976) relacionaram valores dos parâmetros com os solos tipos definidos pelo *SCS*. A Tabela 1.2 reproduz esses valores.

Este modelo foi desenvolvido para trabalhar em conjunto com o método de Clark para a propagação do escoamento superficial e subterrâneo (que será visto mais adiante).

Tabela 1.2. Parâmetros da equação de Horton (FITCH *et al.*, 1976)

Grupo de Solo	I_o (mm/h)	I_b (mm/h)	K (1/s).10 para umidade antecedente		
			Tipo I	Tipo II	Tipo III
A	254,0	25.4	0,06-0,29	0,13-0,66	0,31-1,34
B	203,2	12,7	0,16-0,43	0,36-0,98	0,82-2,64
C	127,0	6,4	0,14-0,42	0,40-1,01	1,01-2,59
D	76,2	2,5	0,15-0,32	0,36-0,81	0,91-2,44

Para bacias urbanas brasileiras (60% das analisadas com área impermeável maior que 20% e 71%, com área inferior a 30 km²), Germano *et al.* (1998) concluíram que: $I_b \approx 0,4$ mm/Δt; $0,5 < h < 0,95$; com predominância entre 0,7 e 0,85; e 4 mm/Δt< I_o <15 mm/Δt ; com predominância entre 8 e 12 mm/Δt.

Para ajuste dos parâmetros podem ser seguidas as seguintes regras:

- $R_{máx}$ é pouco sensível e pode ser facilmente ajustado através da análise dos volumes observados e simulados pelo modelo;
- I_b é obtido a partir do ajuste da recessão do hidrograma
- Quanto maior a área impermeável, menor a sensibilidade aos parâmetros h e I_o.

Método Exponencial

O algoritmo exponencial, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (1973), avalia a taxa de perdas por uma função que relaciona a taxa de perdas da chuva com as perdas acumuladas (Figura 1.8). A equação das perdas é:

$$Per = \Delta t.(AK + DLTK).P^{ERAIN} \quad (1.14)$$

$$AK = \frac{STRKR}{RTIOL^{0,1.CUML}} \quad (1.15)$$

$$DLTK = 0,2.DLTKR.\left(1 - \left(\frac{CUML}{DLTKR}\right)^2\right) \quad (1.16)$$

Onde:

Per: perdas totais no intervalo de cálculo (polegadas);

P: intensidade de chuva (polegadas/h);

DLTKR: parâmetro que representa quantidade acumulada inicial de perdas durante a qual se incrementa o coeficiente de taxa de perdas. O parâmetro é função das características da bacia tais como tipo de solo, uso do solo e cobertura vegetal, (polegadas);

STRKR: valor inicial do coeficiente de perdas. O valor inicial é função da capacidade de infiltração inicial e, portanto, do déficit de umidade do solo e é diferente para diferentes tormentas, (polegadas);

RTIOL: razão do coeficiente de perdas sobre a curva exponencial de perdas que corresponde a 10 polegadas de perda acumulada. Esta variável é considerada função da capacidade da bacia em absorver precipitação. O parâmetro é constante para uma região homogênea;

ERAIN: expoente da intensidade de precipitação na função de taxa de perdas, que reflete a influência da intensidade de chuva na taxa de perdas. O parâmetro é uma característica da região de estudo e pode variar entre 0 e 1;

AK: coeficiente de taxa de perdas avaliado na curva exponencial de perdas acumuladas;

DLTX: incremento no coeficiente de taxa de perdas, até estas atingir o valor de DLTK. Este incremento varia entre um máximo igual a (0,2.DLTKR) ao inicio do evento, até 0 para o valor de perdas acumuladas igual a DLTKR.

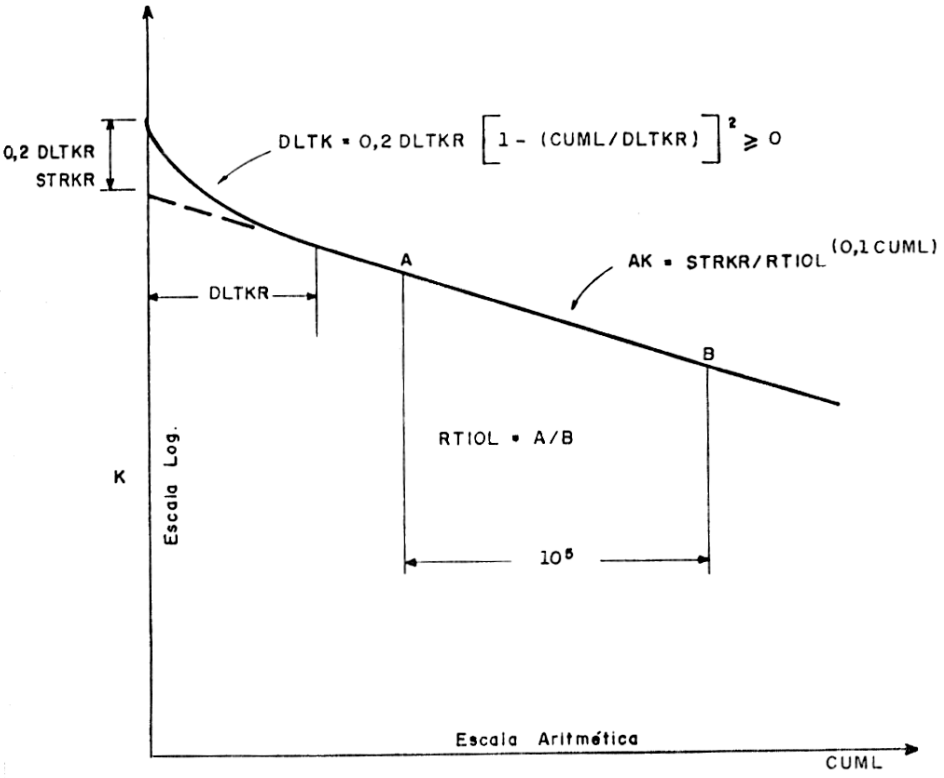


Figura 1.8. Função geral de avaliação de perdas. (HEC, 1974).

Método do número de curva do SCS

O algoritmo do SCS está baseado na proporção:

$$\frac{(P-Q)}{S}=\frac{Q}{P} \tag{1.17}$$

Onde: Pé a precipitação acumulada, (mm); Q é o escoamento direto, (mm); e S corresponde à perda potencial máxima ao início da tormenta (mm).

Considera-se uma perda inicial (Ia) igual à quantidade de precipitação que não produz escoamento no início da tormenta. Restando as perdas iniciais (Ia) da precipitação acumulada (P) na expressão (1.17) e isolando Q, tem-se:

$$Q=\frac{(P-I_a)^2}{(P-0{,}8S)} \tag{1.18}$$

O Ia é considerado como 20% das perdas potenciais máximas. Desta maneira:

$$I_a = 0{,}2 \cdot S \tag{1.19}$$

Introduzindo (1.19) em (1.18) obtém-se:

$$Q = 0 \text{, para } P < I_a \tag{1.20}$$

$$Q = \frac{(P - 0{,}2.S)^2}{(P + 0{,}8.S)} \text{, para } P < I_a$$

Com a equação (1.20) é possível traçar curvas, que relacionam o escoamento direto acumulado com a precipitação total. O número de cada curva (*CN*) está relacionado com a perda potencial inicial máxima S pela seguinte expressão:

$$CN = \frac{25400}{(10 + S)} \tag{1.21}$$

As principais vantagens do método são: (a) parâmetro único (*CN*), (b) ampla difusão com abundante bibliografia sobre experiências de sua utilização. As principais desvantagens são: (a) não considera percolação, ou seja, não permite avaliar escoamento subterrâneo, (b) não considera recuperação da capacidade de infiltração.

Basicamente o método se adapta para cálculos em áreas com escassa informação.

O parâmetro *CN* para a metodologia pode ser obtido da Tabela 1.3 ou Tabela 1.4, ou ainda, diretamente da base de dados incluído na versão *Windows* do sistema IPHS1. Essa tabela refere-se à condição II de umidade antecedente do solo.

Tipos de solos e condições de ocupação: o SCS distingue, em seu método, quatro grupos hidrológicos de solos, descritos a seguir.

GRUPO A - Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

GRUPO B - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menos teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir,

respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial.

GRUPO C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

GRUPO D - Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.

Condição de Umidade Antecedente do Solo: o método do SCS distingue três condições de umidade antecedente do solo, a saber:

CONDIÇÃO I - solos secos - as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm;

CONDIÇÃO II - situação média na época das cheias - as chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram de 15 a 40 mm;

CONDIÇÃO III - solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

A Tabela 1.5 permite converter o valor de CN para condição I ou III, dependendo da situação que se deseja representar.

Efeitos da Urbanização: a aplicação do método do SCS em áreas urbanizadas pode ser feita de duas formas. Uma delas é fazer uso de tabelas que levam em conta os tipos de ocupação do solo, característicos de áreas urbanas (Tabela 1.3). Caso a bacia apresente diversos tipos de solo e de ocupação, deve-se adotar o valor de CN

obtido pela média ponderada dos diversos CNs correspondentes às áreas homogêneas.

Tabela 1.3. Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo		72	81	88	91
com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim		45	66	77	83
cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições:					
Com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
Com relva de 50 a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes de (m²)	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas:					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Tabela 1.4. Valores do parâmetro CN para bacias rurais

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de	Em curvas de nível	62	74	82	85

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
cereais	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Tabela 1.5. Correção do CN em função da umidade antecedente

Condições de umidade		
I	II	III
100	100	100
87	95	99
78	90	98
70	85	97
63	80	94
57	75	91
51	70	87
45	65	83
40	60	79
35	55	75
31	50	70
27	45	65
23	40	60
19	35	55
15	30	50

Método do índice Ø

O índice, segundo é representado na Figura 1.9, é definido como uma capacidade de infiltração constante no tempo. O escoamento direto é igual ao volume de chuva cuja intensidade supera esta capacidade de infiltração. Nos primeiros intervalos de tempo existe um volume de chuva que não produz escoamento, independentemente da intensidade da mesma. Este volume é considerado na forma de uma perda inicial (Ø).

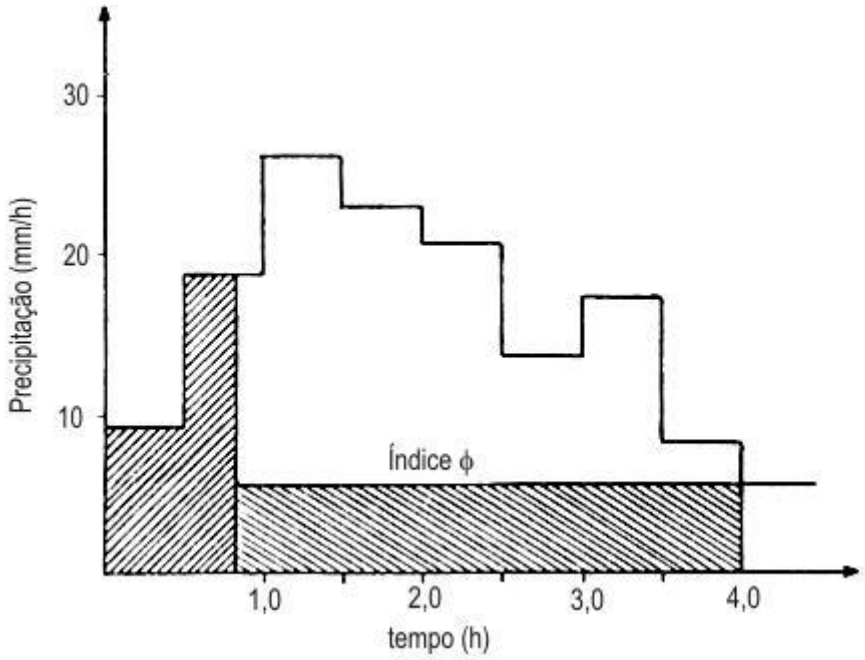


Figura 1.9. Representação do índice Ø.

Método de Holtan

O método de Holtan (1961) considera a capacidade de infiltração num determinado tempo t, como uma função da umidade da primeira camada de solo e de um valor de infiltração básica. A capacidade de infiltração é:

$$I(t) = GI.A.S_a^{1.4} + I_b \qquad (1.22)$$

Onde: I(t) é a capacidade de infiltração no tempo t (mm/h); GI é um índice de crescimento da vegetação; A corresponde à capacidade de infiltração inicial função da umidade do solo, da porosidade e do desenvolvimento das raízes das plantas; S_a é o armazenamento disponível na primeira camada do solo equivalente em mm de água, e I_b é a infiltração básica (mm/h).

1.4.3 Escoamento superficial

A transformação da chuva efetiva no hidrograma de escoamento direto pode ser realizada mediante a escolha dos seguintes algoritmos alternativos:

- Clark;
- Nash modificado;
- Hidrograma triangular do SCS;
- Hidrograma unitário.

Método de Clark

O método de Clark (1945) é uma combinação do histograma tempo-área (HTA) com um reservatório linear simples (RSL) (Figura 1.10). O HTA representa a translação da chuva pelo deslocamento sobre a superfície da bacia. O reservatório linear representa os efeitos de armazenamento das partículas de água no percurso até o ponto da saída da bacia.

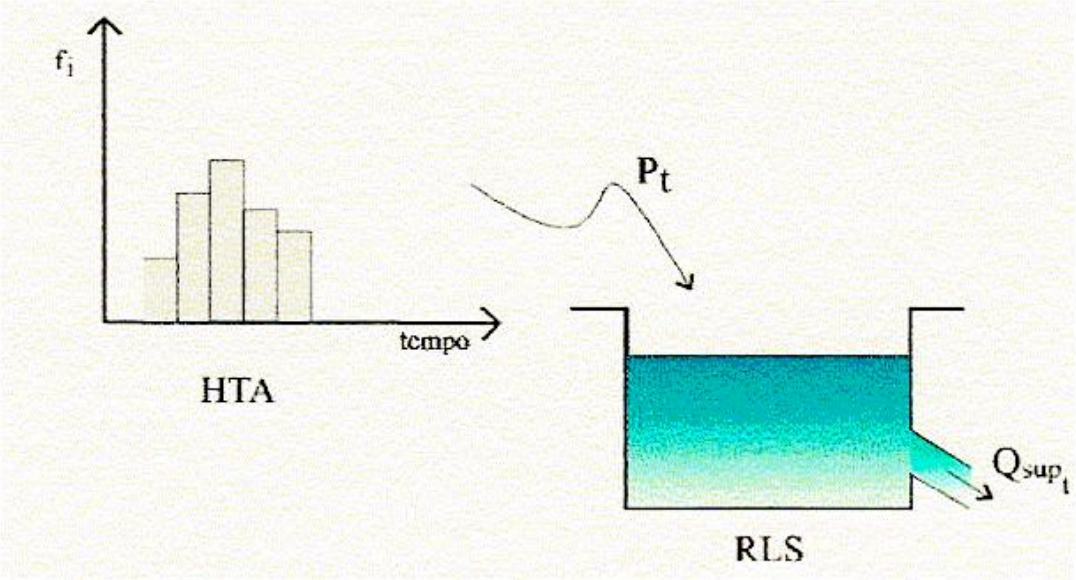


Figura 1.10. Método de Clark (MINE, 1998).

Para obter o HTA deve-se estimar o tempo de concentração da sub-bacia (T_c) e a posição das isócronas, que representam pontos com igual tempo de translado até a seção de controle (Figura 1.11). Para cada isócrona (t_i) deve-se calcular a área tracejada (A_i), da referida figura. As ordenadas do HTA são obtidas por:

$$fi = \frac{A_i}{A_t} \tag{1.23}$$

Onde A_t é a área total da bacia.

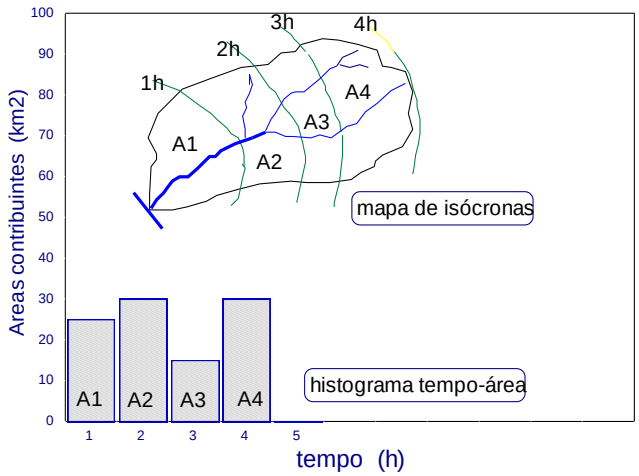


Figura 1.11. Isócronas e histograma tempo-área (PORTO, 1995).

A determinação do HTA pode ser substituída, sem muito erro, pelo uso de um histograma sintético. O referido histograma é obtido admitindo-se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto em estudo à seção principal.

No modelo foi incluída a representação do HTA a partir das diretivas do HEC (1974; Figura 1.12). A área acumulada de contribuição é relacionada ao tempo de percurso pelas seguintes equações:

$$A_c = a.T^n \text{ ,} \qquad 0<T<1/2 \qquad (1.24)$$

$$A_c = 1 - a.(1-T)^n \text{ ,} \qquad 0<T<1/2 \qquad (1.25)$$

$$a = (0.5)^n \qquad (1.26)$$

Onde: A_c é a área acumulada expressa relativamente à área total; T é o tempo em unidades do tempo de concentração; n é um coeficiente que varia com a forma da bacia (Figura 1.12).

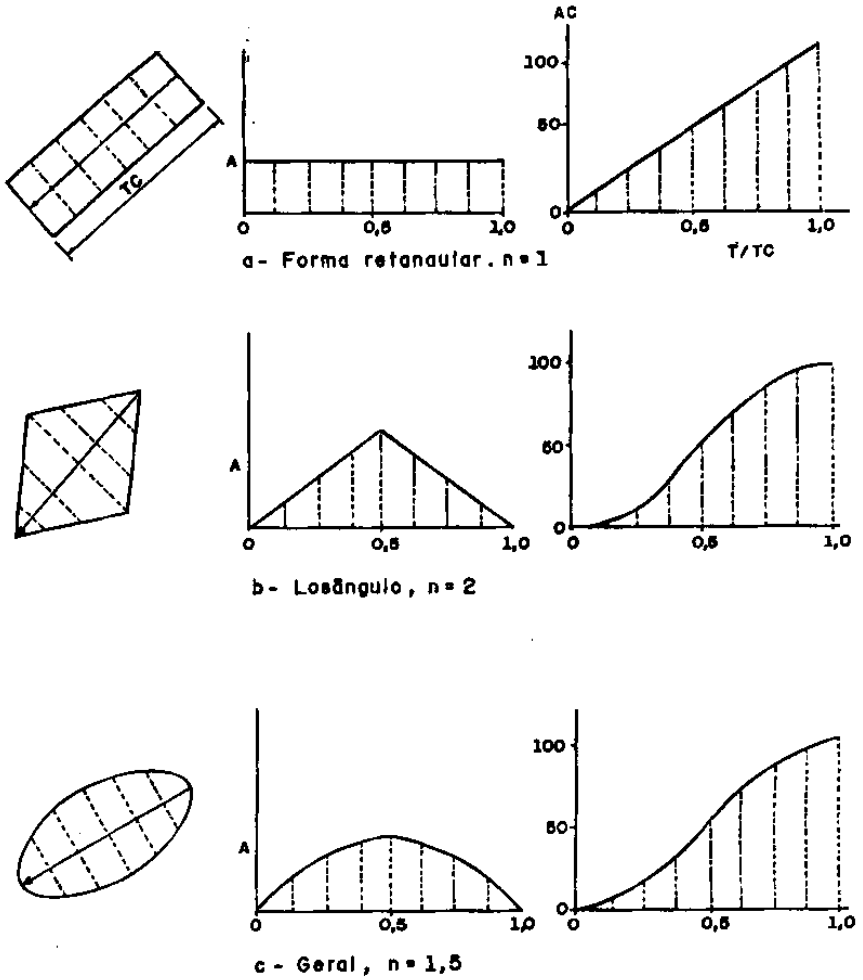


Figura 1.12. Forma do histograma tempo-área para diferentes valores do parâmetro *n* (HEC, 1974).

Cada lâmina de chuva efetiva é distribuída no tempo pelo HTA e filtrada pelo reservatório linear simples (RLS). A vazão de saída é calculada cada intervalo de tempo como:

$$Q_{(t+1)} = Q_{(t)}.e^{-\frac{t}{\Delta k}} + VE_{(t+1)}.\left(1 - e^{-\frac{t}{\Delta k}}\right) \quad (1.27)$$

Onde: Q_t é a vazão de saída no instante t; $VE_{(t+1)}$ é a vazão de entrada ao RLS; K é a constante de armazenamento do RLS.

Os parâmetros são fornecidos pelo usuário ou podem ser calculados pelo modelo, utilizando as equações de Dooge (1973):

$$T_c[h] = 3{,}83 . \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (1.28)$$

$$K[h] = 125{,}5 . \frac{A^{0,23}}{S^{0,7}} \quad (1.29)$$

Onde A é a área da bacia em Km^2, S é a declividade média da bacia em (m/10 km); ou as seguintes expressões obtidas para bacias urbanas brasileiras por Germano (1997), desenvolvidas para uso com o modelo IPH II.

$$Tc[min] = 18{,}628 \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad (1.30)$$

$$K[min] = 24{,}058 \frac{L^{1,063}}{S^{0,126} . IMP^{0,549}} \quad (1.31)$$

Onde *L* é o comprimento do rio principal em km; *S* é a declividade do rio principal em %; IMP é a área impermeável.

Método de Nash modificado

Este algoritmo desenvolvido pelo SCS para calcular o hidrograma unitário sintético, HU (1mm, t), está baseado no modelo de cascata de reservatórios lineares de Nash . Para representar o HU são utilizadas duas equações, uma até o segundo ponto de inflexão do hidrograma e outra para representar a recessão do hidrograma (Figura 1.13).

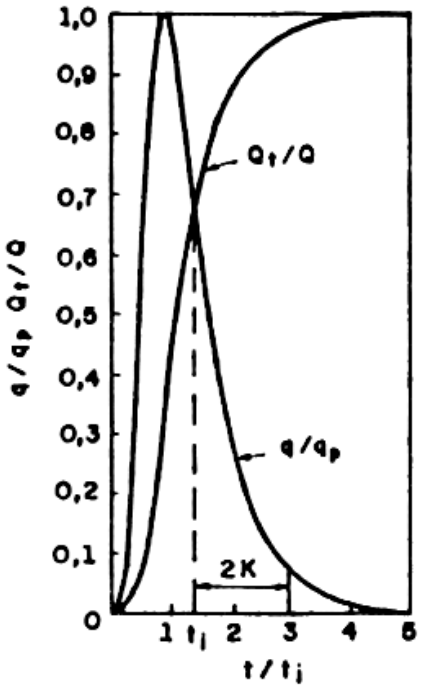


Figura 1.13. Hidrograma unitário adimensional (HYMO, 1972).

O hidrograma unitário adimensional resultante é função de dois parâmetros: T_p, tempo ao pico do HU; e K , retardo do reservatório linear simples que caracteriza o esgotamento do escoamento superficial.

O número de reservatórios (n) do modelo Nash é calculado em função de T_p e K. O calculo de n é realizado em forma iterativa utilizando a seguinte equação:

$$n = \frac{\delta_t}{\frac{k}{T_p}\left\{\ln\left[\frac{1+\left(\frac{1}{n-1}\right)^{0.5}}{1+\left(\frac{1}{n-1}\right)^{0.5}+\delta_t}\right]+\delta_t\right\}}+1 \qquad (1.32)$$

A equação (1.32) é obtida a partir da continuidade da função do modelo de Nash com a função de recessão, segundo a equação de um reservatório linear simples, imposta a partir do segundo ponto de inflexão do hidrograma unitário adimensional, onde t é o intervalo de tempo.

O hidrograma unitário instantâneo adimensional é obtido por:

$$q^*_{(t)} = (t^*) e^{(1-n).(t^*-1)} \quad (1.33)$$

Onde:

$$t^* = \frac{t}{t_p} \quad (1.34)$$

$$q^*_{(t)} = \frac{q_t}{q_{tp}} \quad (1.35)$$

O HUI é construído considerando a equação (1.33) até t_i (segundo ponto de inflexão), entre t_i e t_{i+2K} a equação de deflexão, ou seja:

$$q = q_{(ti)}.e^{-\frac{(ti-t)}{k}} \quad (1.36)$$

Para o intervalo $t > t_{i+2K}$, o parâmetro K é substituído por 3K.

O sistema computacional permite ingressar valores de K e T_p estimados a partir de dados observados. No caso de bacias sem dados K e T_p são estimados pelas seguintes equações de regressão, resultantes da análise de HUs de bacias nos EUA:

$$T_p = \frac{1{,}44.A^{0,42}}{S_o^{0,46}\left(\frac{C^2}{A^{0,13}}\right)} \quad (1.37)$$

$$K = \frac{5{,}95.A^{0,23}}{S_o^{0,77}\left(\frac{C^2}{A^{0,12}}\right)} \quad (1.38)$$

Onde: T_p é o tempo ao pico do HU (h);

A é a área da bacia (km²);

C é o comprimento do canal principal (km²);

S_o é a declividade do canal principal;

R é o retardo nos reservatórios lineares simples (h).

Hidrograma triangular do SCS

O método do hidrograma unitário triangular, HU(10mm,t) do SCS (Figura 1.14) baseia-se nas seguintes equações:

$$qp = \frac{2{,}08.A}{\left(\frac{t}{2} + 0{,}6.t_c\right)} \tag{1.39}$$

$$T_p = \left(\frac{t}{2} + 0{,}6.t_c\right) \tag{1.40}$$

$$T_b = T_p + t_r = 2{,}67.T_p \tag{1.41}$$

$$T_c = \frac{3{,}83.A^{0{,}41}}{S^{0{,}17}} \tag{1.42}$$

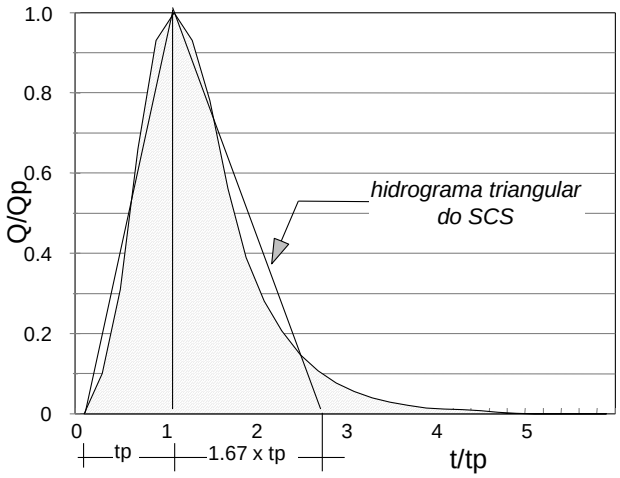


Figura 1.14. Hidrograma unitário triangular do SCS.

Onde:

q_p: vazão pico do hidrograma unitário(m^3/s);

A: área da bacia (km^2);

Δt: intervalo de tempo de cálculo (h);

T_c: tempo de concentração da bacia (h);

T_b: tempo base do HU (h);

T_p: tempo ao pico do HU (h);

S: declividade da bacia (m/10 Km).

Hidrograma unitário observado

Em função das ordenadas do hidrograma unitário, HU (1mm,t) fornecido pelo usuário, são calculadas as vazões no ponto de saída da bacia por:

$$Q_{(j)} = \sum_{i=1}^{j} p_i . q_{j-i+1} \text{ , para } j<n \quad (1.43)$$

$$Q_{(j)} = \sum_{i=j-n+1}^{j} p_i . q_{j-i+1} \text{ , para } j \geq n \quad (1.44)$$

Onde:

$Q_{(j)}$: vazão de saída da bacia (m^3/s);

$q_{(\ )}$: ordenadas do hidrograma unitário ($m^3/s.mm$);

$p_{(i)}$: precipitação efetiva no intervalo de tempo (mm);

n: número de ordenadas do hidrograma unitário.

1.4.4 Escoamento de base

Quando o algoritmo de Horton modificado é utilizado para estimar a infiltração e a percolação, é também possível calcular o escoamento base produzido pela bacia. Para isto, utiliza-se um reservatório linear simples:

$$QSS_{(t+1)} = QSS_{(t)} . e^{\frac{-\Delta_t}{k}} + VP_{(t+1)} . \left(1 - e^{\frac{-\Delta_t}{k}}\right) \quad (1.45)$$

Onde:

$QSS_{(t)}$: vazão base no tempo t (mm/Δt);

K :constante de armazenamento do reservatório linear simples (h);

VP: volume percolado (mm/Δt).

Como valor inicial se sugere utilizar 30Δt devido à baixa sensibilidade do hidrograma resultante de eventos de pequena duração ao escoamento de base.

1.5 Modelos do sistema – *Módulo rio*

Este módulo é formado pelos modelos que representam o processo de propagação de ondas de cheia em rios, canais e reservatórios.

1.5.1 Escoamento em rios e canais

O procedimento de propagação de cheias utilizado é o método Muskingum em suas diferentes versões:

- Clássico;
- Muskingum-Cunge;
- Muskingum-Cunge com planície de inundação;
- Muskingum-Cunge adaptado para condutos fechados.

As versões *Clássico* e *Muskingum-Cunge* podem ser utilizadas na forma linear ou não-linear, entretanto a opção *Muskingum-Cunge com planície de inundação* é não-linear. As opções *Muskingum-Cunge*, *Muskingum-Cunge com planície de inundação* e *Muskingum-Cunge adaptado para condutos fechados* admitem contribuição lateral distribuída.

A escolha da melhor alternativa a ser utilizada depende das características do trecho de rio a ser simulado, dos dados disponíveis e da natureza do problema a ser resolvido.

A principal limitação deste método é que os efeitos de jusante sobre o escoamento de montante não são considerados. Por exemplo, um rio que escoa para um lago ou para o mar sofre represamento e interferência de jusante que modifica o escoamento. Neste caso, o modelo não pode ser utilizado em nenhuma de suas versões.

Método Muskingum Clássico

O método foi desenvolvido por McCarthy (1940) no rio Muskingum. Está baseado na equação de continuidade concentrada (equação 1.46) e numa função empírica (equação 1.47) que relaciona o armazenamento (*S*) com as vazões de entrada (*I*) e saída (*O*) do trecho de propagação:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \tag{1.46}$$

$$S = K[X.I + (1-X).O] \tag{1.47}$$

Substituindo (1.46) em (1.47) e discretizando, resulta:

$$O_2 = C_1.I_2 + C_2.I_1 + C_3.O_1 \tag{1.48}$$

Com: $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Onde: O_1, O_2 são as vazões de saída do trecho de canal ao início e ao final do intervalo de tempo; I_1, I_2 são as vazões de entrada ao início e fim do intervalo de tempo; K é o parâmetro representativo do tempo de deslocamento da onda no trecho de propagação; X é o parâmetro que pondera a influência das vazões de entrada e saída do trecho na função de armazenamento; C_1, C_2 e C_3 são coeficientes resultantes da discretização que dependem de K, X e t.

Para utilizar esta opção, é necessário estimar *a priori* os parâmetros a partir de dados observados. A estimativa pode ser realizada na forma gráfica, por mínimos quadrados ou por otimização.

Para garantir a estabilidade numérica da solução, o parâmetro X deve ser menor ou igual a 0,5. Para que os coeficientes C_1, C_2 e C_3 sejam maiores que zero, o intervalo de tempo de cálculo Δt é limitado por:

$$2.K.X < \Delta t < 2.(1-X).K$$

O sistema permite que o método possa ser utilizado na forma: (a) linear; (b) não-linear. No caso (a) a propagação é realizada utilizando um único conjunto de valores dos parâmetros K e X. No caso (b), especifica-se a variação de X e K com a

vazão. O modelo calcula o valor dos parâmetros em cada intervalo de tempo em função da vazão calculada no intervalo anterior.

Método Muskingum-Cunge

Cunge (1969) relacionou a difusão numérica produzida pelo método Muskingum com o coeficiente de difusão hidráulica da equação de difusão linearizada, ou seja, Cunge igualou a difusão numérica do método de Muskingum à difusão real, transformando, desta forma o modelo Muskingum num modelo de difusão (que, no entanto não tem capacidade para levar em conta efeitos de jusante).

Os parâmetros K e X para este método podem ser estimados com base nas características físicas do trecho de propagação e com base na discretização, utilizando as seguintes equações:

$$X = 0{,}5 - \frac{q}{2.S_o.c.\Delta x} \tag{1.49}$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} \tag{1.50}$$

Onde: *q* é a vazão específica por unidade de largura do canal; S_o é a declividade de fundo do canal; *c*, a celeridade da onda.

A celeridade da onda *c* é obtida pela expressão:

$$C = \frac{1}{B}.\frac{dQ}{dh} \tag{1.51}$$

Utilizando a equação de Manning (canais prismáticos) para calcular a vazão total Q, a celeridade pode ser estimada por:

$$C = \frac{5}{3}.\frac{S_o^{0,3}.q^{0,4}}{n^{0,6}} \tag{1.52}$$

Onde: B é a largura do canal; n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Jones (1981) demonstrou que a difusão numérica afeta a velocidade da onda ao mesmo tempo que a atenua. Também analisou a solução numérica da equação de difusão, com base no esquema utilizado pelo método Muskingum, definindo os erros

envolvidos na discretização. Na Figura 1.15 são apresentados as isolinhas do erro numérico na atenuação e na velocidade para diferentes valores de X e K/Δt. Nesta figura, no intervalo de X entre 0,2 e 0,5 pode-se ajustar uma curva que atenua as duas funções dentro da margem de 2,5% de erro.

O sistema IPHS1 permite utilizar este método na forma linear ou não-linear com contribuição lateral distribuída. Na aplicação linear é necessário definir uma vazão específica de referência (q_o), (geralmente adotada como 2/3 da vazão específica de pico do hidrograma de montante). Com q_o e as características físicas do canal o modela estima a celeridade média da onda de cheia com a equação (1.52). Os parâmetros K e X constantes são estimados com as equações (1.49) e (1.50), uma vez adotada a discretização espacial e temporal. Ressalta-se a importância do cumprimento das condições estabelecidas por Jones, visto que diferenças de até 100% nos valores foram verificadas em caso de não cumprimento.

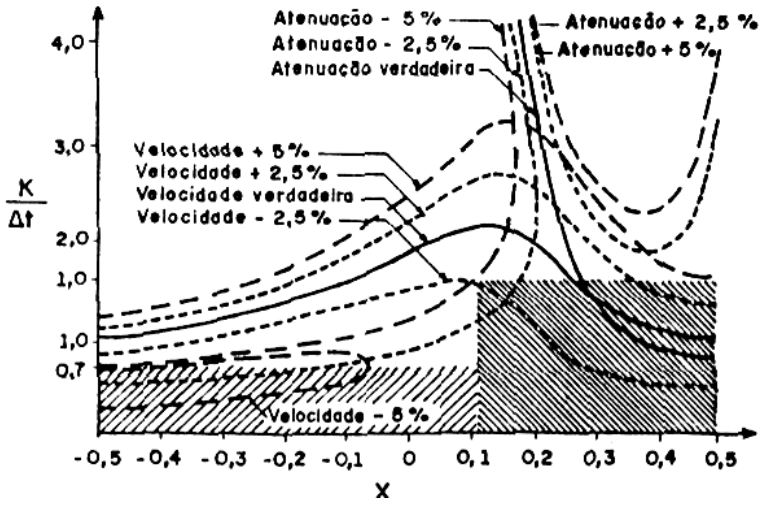


Figura 1.15. Relação entre X e K/Δt (JONES, 1981).

O modelo não-linear é caracterizado pela variação dos parâmetros em função da vazão ao longo da simulação. Considerando a malha de cálculo da Figura 1.16 a

celeridade C e o parâmetro X são estimados em cada intervalo de tempo por (PONCE & YEVJEVICH, 1978; ZAMANILLO & TUCCI, 1986):

$$C = \frac{5}{9}.\frac{S_o^{0,3}}{n^{0,6}}.q.e \qquad (1.53)$$

Onde: $q.e = q_{t,j}^{0,4} + q_{t,j+1}^{0,4} + q_{t+1,j}^{0,4}$;

$$X = 0,5 - \frac{q_s}{2.S_o.C.\Delta X} \qquad (1.54)$$

Onde: $q_s = \frac{1}{3}.\left(q_{t,j} + q_{t,j+1} + q_{t+1,j}\right).$

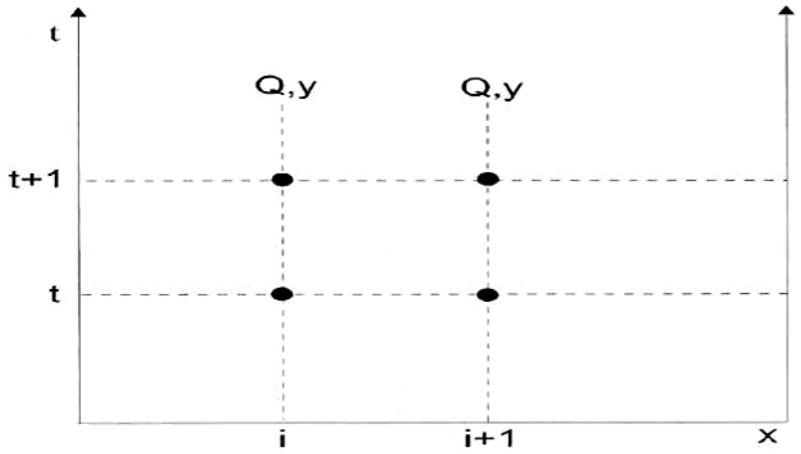


Figura 1.16. Malha de cálculo.

A alternativa não-linear deve ser utilizada quando a celeridade da onda de cheia varia significativamente com a magnitude das vazões.

Nas duas alternativas deve-se especificar a largura do canal, a declividade do fundo, o comprimento do trecho de propagação, o intervalo de tempo de calculo, o número de trechos, a rugosidade, e o número de armazenamento do hidrograma que contribui lateralmente de forma distribuída. O intervalo de tempo de cálculo deve ser submúltiplo do Δt escolhido para a simulação das outras operações hidrológicas.

Método Muskingum-Cunge com planície de inundação

Este algoritmo está baseado na metodologia apresentada por Miller & Cunge (1975), que utiliza o método de Muskingum-Cunge para o caso de extravasamento da calha principal do rio no deslocamento de uma cheia. Considerando a seção transversal da Figura 1.17:

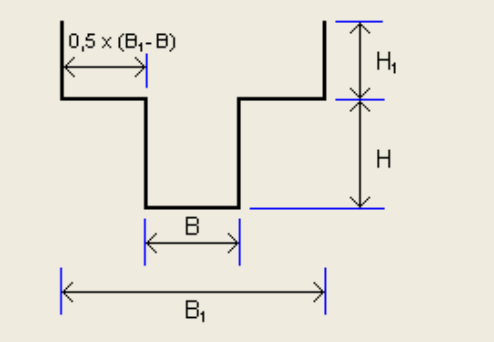


Figura 1.17. Seção transversal composta (MILLER & CUNGE, 1975).

Com:

$$h_i = h - z_i \tag{1.55}$$

$$A = \sum b_i . h_i \tag{1.56}$$

$$\bar{K} = \sum \frac{1}{n_i} . b_i . h_i^{5/3} \tag{1.57}$$

$$Q = \bar{K} . S_o^{1/2} \tag{1.58}$$

Onde: $\overline{K}$ é a condutividade hidráulica da seção transversal; n_i é o coeficiente de Manning da subseção i.

Os parâmetros K e X do método Muskingum-Cunge podem ser estimados como:

$$K = \frac{\Delta x . \sum b_i}{1{,}33 . S_o^{0,5} . \sum \frac{b_i}{n_i} . (h_i - Z_i)^{0,67}} \tag{1.59}$$

$$X = 0{,}5 - 0{,}5.\frac{K.K}{S_o{}^{0,5}.\Delta x^2.\sum b_i} \qquad (1.60)$$

Para estimar X e K, é previamente calculada uma tabela com o auxílio das equações (1.59) e (1.60) para relacionar X, K e Q para a faixa de níveis e vazões de interesse. Em cada intervalo de cálculo os parâmetros K e X são determinados da tabela utilizando a vazão da equação (1.61) (Figura 1.16):

$$Q = \frac{\left(Q_{t,j} + Q_{t,j+1} + Q_{t+1,j}\right)}{3} \qquad (1.61)$$

Os dados fornecidos são largura do canal principal e da planície de inundação, o comprimento do trecho de propagação, o número de subtrechos, o intervalo de tempo de cálculo, a declividade do fundo do canal, as rugosidades do canal principal e da planície de inundação, a cota de fundo da planície de inundação e o número de armazenamento do hidrograma de contribuição lateral distribuída.

Muskingun-Cunge não-linear para condutos fechados

Esta rotina do programa IPHS1 utiliza o algoritmo de propagação de Muskingun-Cunge não–linear, adaptado para fazer a propagação em canais (condutos) fechados, mas que não estejam trabalhando sob pressão.

IMPORTANTE: como o modelo de Muskingum-Cunge não foi originariamente concebido para sistemas fechados, e, em algumas regiões onde existem condutos fechados as declividades podem ser muito baixas, é necessário VERIFICAR A APLICABILIDADE DO MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE (Diagrama de Jones, 1981).

Assim como para o Muskingun-Cunge linear, não é necessário que o usuário informe a vazão de referência, o intervalo de tempo de cálculo, e o número de trechos, pois a rotina foi implementada para isso seja feito automaticamente.

Neste módulo, o usuário pode representar as situações onde ocorrem trechos de propagação paralelos. Isso é muito comum em drenagem urbana, por exemplo: existia certo grau de urbanização e a rede de drenagem existente tinha capacidade

suficiente, mas com o aumento da urbanização, as vazões aumentam, havendo necessidade de uma maior capacidade da rede de drenagem. Então o órgão público, normalmente, coloca um conduto auxiliar, paralelo ao que existia antes, de forma a suprir a falta de capacidade. Esta opção está em trechos paralelos ao trecho principal. É importante colocar a seção mais alta ou de maior diâmetro como primeira tubulação em caso de trechos paralelos, já que esta seção será utilizada como guia para a discretização da seção.

As seções possíveis de serem utilizadas são: circular, retangular e trapezoidal. Se a seção é circular, o usuário informa o diâmetro e a rugosidade. Se a seção é retangular, o usuário informa a altura, largura e rugosidade. Se a seção é trapezoidal, informa-se altura, largura, rugosidade, taludes do lado esquerdo e lado direito (LE e LD).

Existe ainda a opção de tratamento dos volumes excedentes (excessos) que não conseguem entrar no conduto de drenagem devido à falta de capacidade do sistema de drenagem. Os excessos podem ser simplesmente armazenados, e então a saída fornece um arquivo de alagamentos, onde é informado o volume que não conseguiu entrar no sistema e o tempo em que há este acúmulo. Se o usuário prefere representar o que normalmente ocorre em redes de drenagem onde há declividade, ele pode optar por fazer propagação do escoamento excedente na rua. Assim, toda a água que não consegue entrar no conduto é propagada pela rua, até encontrar o próximo trecho d'água (neste caso deve ser fornecido um coeficiente de rugosidade compatível com uma rua com carros, paralelepípedos, lixo, etc.). Ainda existe a possibilidade de fazer o redimensionamento dos condutos. Nesta opção ele tem que escolher qual o tipo de seção que será utilizada como referência para redimensionar. Por exemplo, se o conduto principal (1) é um circular, e houver um trecho paralelo (2) retangular, na hora de solicitar o redimensionamento, as opções serão de redimensionar para um conduto circular ou retangular. Se o usuário escolhe o circular não é necessário informar nenhuma característica a ser preservada, já que a área

depende unicamente do diâmetro. Se o usuário escolher retangular, ele pode escolher se quer manter alguma característica geométrica da seção original (altura e/ou largura) – o mesmo é válido para trapezoidal, onde ainda pode-se manter a declividade dos taludes do LE e LD.

Na opção de armazenar, é gerado um arquivo (alagamento.iph) onde está esta informação. Na opção de propagar em rua, é gerado o arquivo (qrua.iph) onde está esta informação. Na opção de redimensionamento, é gerado o arquivo (comentario.iph) onde está esta informação. Para o usuário da interface *Windows* esta informação é indicada na tela que aparece imediatamente após a simulação.

1.5.2 Escoamento em reservatório

O método de Puls para propagação de cheias em reservatório está baseado na equação de continuidade concentrada (equação 1.46), sem contribuição lateral; e a relação da vazão de saída do reservatório em função do armazenamento O=f(S) (considerando a linha de água do reservatório horizontal). Discretizando a equação da continuidade (1.46) num intervalo Δt:

$$\frac{S_2}{\Delta t} + 0{,}5.O_2 = \frac{S_1}{\Delta t} - 0{,}5.O_1 + 0{,}5.(I_1 + I_2) \qquad (1.62)$$

Onde. I_1, I_2 são as vazões de entrada ao reservatório ao início e ao final do intervalo de tempo; O_1, O_2 são as vazões de saída ao início e fim do intervalo de tempo: S_1, S_2 são os armazenamentos ao início e ao final do intervalo de tempo.

O termo da direita da expressão (1.62) é conhecido ao início de cada intervalo de tempo. Para obter O_2 é necessário utilizar a relação (equação1.63), construída a partir da relação O=f(S) conhecida.

$$O_2 = f.\left(\frac{S}{\Delta t} + 0{,}5.O_2\right) \qquad (1.63)$$

O modelo permite que a relação (1.63) seja calculada a partir da relação cota-volume do reservatório e das características das estruturas de saída de água

(coeficiente de descarga de vertedor ou descarregador de fundo, largura e cota da crista do vertedor, etc.).

A equação do descarregador de fundo utilizada no modelo é expressa por:

$$Q = C.A.\sqrt{2.g.\Delta z} \quad (1.64)$$

Onde: C é o coeficiente de vazão; A é a área da seção transversal do descarregador de fundo; g é a aceleração da gravidade; Δz é a diferença de nível entre montante e jusante.

O coeficiente de descarga C (comumente utilizado C=0,6) depende da forma e dimensões do descarregador, e da vazão escoada. Para maiores detalhes consultar Chow (1959) e Ballofet *et al.* (1952).

A equação do vertedor utilizada no modelo é expressa por:

$$Q = C.L.\Delta z^{1,5} \quad (1.65)$$

Onde: C é o coeficiente de descarga; Δz é a diferença de nível entre a água e a cota da crista do vertedor.

O coeficiente de descarga C depende de muitos fatores, no entanto, pode ser usado, sem grande erro, um valor médio de C=1,838 obtido por Francis (1905). O modelo recusará valores de coeficiente de descarga superiores a 3,0 e inferiores a 1,5.

Alternativamente o modelo simula a operação de diferentes estruturas extravasoras. Nesse caso deve-se fornecer o número de operações previsto (max = 10), o intervalo de tempo em que se produzem as alterações e a relação O=f(S) válida para cada movimentação.

O modelo IPHS1 também contempla o caso da existência de uma estrutura tipo *by-pass*, ou seja, um elemento que permite a entrada de água em um reservatório somente a partir de uma determinada vazão. Esta estrutura é amplamente utilizada em drenagem urbana de forma de limitar o uso dos reservatórios de detenção aos eventos mais críticos.

1.5.3 Derivação

A derivação de vazões pode ser realizada da seguinte maneira:

- Determinando diretamente a percentagem de vazão que vai ser extraída do canal principal (operação hidrológica indicada para a versão *Fortran*).
- O programa estima automaticamente a partir das características físicas dos canais envolvidos a vazão de derivação.

O valor derivado é automaticamente subtraído da vazão do canal principal, que pode continuar em outros trechos de simulação.

Para o cálculo automático, o algoritmo empregado para simular o escoamento numa derivação de vazões baseia-se nas seguintes hipóteses simplificativas de fluxo: (a) relação biunívoca das vazões com o nível da água; (b) na vizinhança da divergência os nível da água são iguais no canal de derivação e no canal principal a jusante da derivação. Assim, a equação de continuidade é:

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{1.66}$$

Empregando a equação de Manning para a declividade de energia, tem-se:

$$h = \frac{\left(n^{3/5}.P^{2/5}.Q^{3/5}\right)}{\left(S_o^{3/10}.B\right)} \tag{1.67}$$

$$h_1 = h_2 \tag{1.68}$$

Substituindo (1.67) e (1.68) em (1.66) e isolando Q_1, fica (1.69):

$$Q_1 = \frac{Q}{\left(1 + \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{2/3}.\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{5/3}.\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/2}.\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\right)} \tag{1.69}$$

Sendo: Q, Q_1, Q_2: vazões no canal principal a montante da divergência, vazão derivada e vazão no canal principal a jusante, respectivamente; P_1, P_2 são os perímetros molhados no canal de derivação e no canal principal a jusante da derivação, respectivamente; h_l, h_2 são os níveis da água no canal de derivação e no canal principal a jusante da derivação, respectivamente; B_1, B_2 são as larguras no canal

de derivação e no canal principal a jusante da derivação, respectivamente; n_1, n_2 correspondem às rugosidades no canal de derivação e no canal principal a jusante da derivação, respectivamente; e S_1, S_2 são as declividades no canal de derivação e no canal principal a jusante da derivação, respectivamente.

2 MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA IPHS1 - UTILIZAÇÃO

2.1 Introdução

Utilizando como base a Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas Filho (2000), foi desenvolvida a versão *Windows* do IPHS1, que encapsula a versão DOS, através de uma interface inteligente.

A versão utilizada nas simulações para o PDDU – DF, e descrita neste Manual Técnico, ainda possui características de uma versão Beta, podendo apresentar problemas não detectados nos testes. Por isso, é fundamental que o usuário tenha em mente que *um projeto é obra de um engenheiro ou profissional habilitado para tal e nunca de um programa computacional*. Este modelo é apenas uma ferramenta que, quando bem utilizada, poupa tempo e amplia o horizonte de análise.

A seguir serão explicados os procedimentos para utilização do Modelo IPHS1.

2.2 Instalação do IPHS1

2.2.1 Instalando o programa

O IPHS1 apresenta um único arquivo de instalação, o *IPHS1.exe*, o qual pode ser adquirido gratuitamente através do site http://www.h2bio.net/.

Basta salvar esse arquivo em qualquer diretório do disco rígido ou, então, realizar a instalação diretamente de um CD. Iniciado o programa de instalação, o usuário deverá seguir exatamente as instruções ali contidas.

O programa de instalação sugere um caminho básico do tipo: *C:\Arquivo de Programas*. O usuário pode aceitar a sugestão ou então indicar outro caminho. Deve,

entretanto ficar ciente de que escolhido o caminho, o IPHS1 irá, a partir dele, criar um diretório próprio, como se segue: *C:\Arquivo de Programas\IPHS1*. Caso o caminho indicado seja outro, este diretório será criado sob ele.

2.2.2 Desinstalando o programa

O processo de desinstalação do IPHS1 é também muito simples, sugerindo-se ao usuário que faça isso a partir da opção Instalar/Desinstalar Programas do Painel de Controle do Windows. Para isso, basta localizar na janela correspondente o IPHS1, selecioná-la e ativar o desinstalador, seguindo depois as instruções.

2.3 Interface do IPHS1

2.3.1 Janela principal

O IPHS1 quando iniciado apresenta ao usuário uma janela semelhante à demonstrada na Figura 2.1 e que constitui a janela principal do aplicativo

Na janela principal (Figura 2.2) encontram-se alguns importantes elementos que compõe a interface que permite o gerenciamento das diferentes operações proporcionadas pelo IPHS1: a Barra de Menus, a Barra de Ferramentas Principal, a Área de Projeto, a Barra de Ferramentas Hidrográfica, a Caixa de Título, Descrição e Comentários, e a Barra de Avisos.

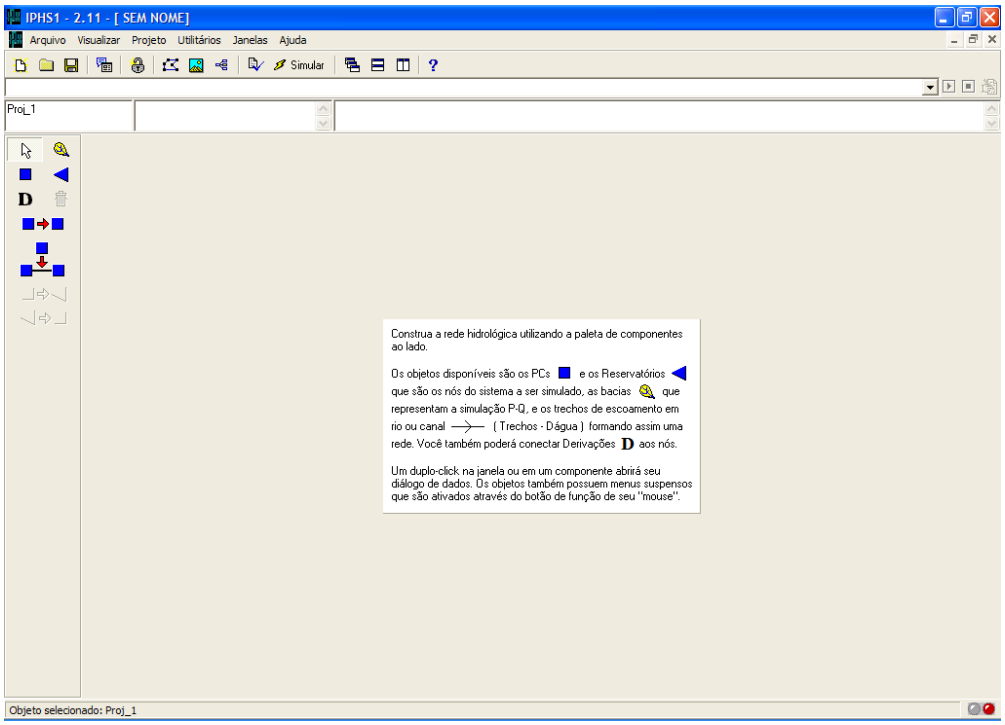

IPHS1 - 2.11 - [SEM NOME]
Arquivo Visualizar Projeto Utilitários Janelas Ajuda
Simular
Proj_1
Construa a rede hidrológica utilizando a paleta de componentes ao lado.
Os objetos disponíveis são os PCs e os Reservatórios que são os nós do sistema a ser simulado, as bacias que representam a simulação P-Q, e os trechos de escoamento em rio ou canal (Trechos - Dágua) formando assim uma rede. Você também poderá conectar Derivações D aos nós.
Um duplo-click na janela ou em um componente abrirá seu diálogo de dados. Os objetos também possuem menus suspensos que são ativados através do botão de função de seu "mouse".
Objeto selecionado: Proj_1

Figura 2.1. Tela principal do IPHS1.

A Barra de Menus possibilita o acesso a todas as funções do IPHS1, algumas das quais estão, também, disponibilizadas através da Barra de Ferramentas Principal. Ambas serão descritas minuciosamente no próximo item.

A Área de Projeto, como já foi dito acima, pode ser vista como uma *prancheta* onde podem ser desenhados os diferentes elementos que representam cada *Operação Hidrológica* que compõe o *Projeto* em estudo, os quais podem estar ou não configurados na forma de uma *Rede Hidrográfica*. Além disso, conforme será visto, a *identificação do projeto* e outras informações de cunho geral são acessadas através da Área de Projeto.

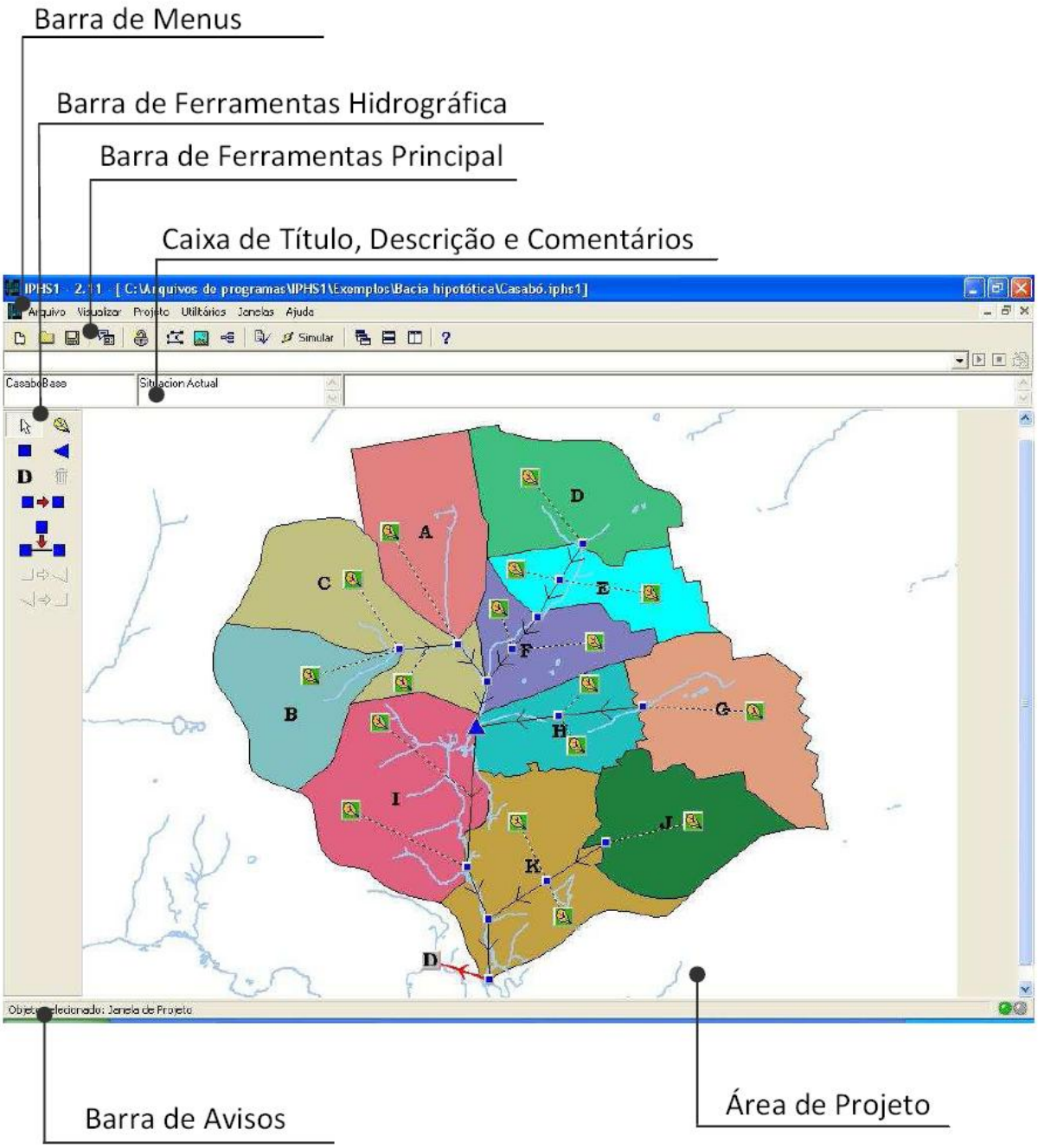


Figura 2.2. Elementos da interface na tela principal do IPHS1.

A Barra de Ferramentas Hidrográfica contém os elementos que possibilitam o lançamento na *Área de Projeto* das *Operações Hidrológicas* que irão caracterizar o Projeto a ser trabalhado. A Caixa de Título, Descrição e Comentário, como o próprio nome já indica, permite ao usuário identificar o Título, a Descrição e o Comentário que deu a cada objeto inserido na Área de Projeto.

2.3.2 Opções da Barra de Menus

Arquivo:

Novo (Ctrl + N)	Cria um Novo Projeto, apresentando sua Área de Projetos, vazia, na tela.
Abrir (Ctrl + A)	Abre um arquivo de Projeto existente.
Fechar	Fecha um Projeto aberto.
Salvar (Crtl + S)	Salva o Projeto ativo.
Salvar Como (Crtl + Alt + S)	Salva um Projeto ativo com outro nome e em qualquer Diretório.
Sair	Finaliza a operação do IPHS1.

Visualizar:

Editor de Scripts	Abre o Editor de Pascal Script.
Gerenciador de Projeto (Crtl + P)	Abre o Gerenciador de Projeto
Mensagens (Crtl + M)	Abre o Editor de Mensagens.
Variáveis Globais do Script (Crtl + G)	Abre o Gerenciador de Variáveis Globais do Script

Projeto:

Editar Dados Gerais	Abre janela para editar dados de projeto
Assistente de Preenchimento dos Dados	Abre janela para editar dados de projeto
Remover Objeto	Remove o objeto selecionado
Converter PC para Reservatório	Converte um PC em reservatório
Converter Reservatório para PC	Converte um reservatório em PC
Carregar Imagem de Fundo	Lê uma imagem (.bmp) para servir de fundo para a Área de Projeto.
Limpar Imagem de Fundo	Permite remover uma imagem de fundo da Área de Projeto.

Realizar Diagnóstico Completo (Crtl + D)	Faz um diagnóstico completo da Rede Hidrográfica verificando sua consistência.
Simular (F9)	Executa o IPHS1 DOS.
Plotar Hidrogramas Resultantes	Habilitado somente após a opção "Simular" – abre uma janela onde é possível identificar o objeto onde se deseja o hidrograma.
Visualizar Hidrogramas Resultantes em Planilha	Habilitado somente após a opção "Simular" – abre uma janela onde é possível identificar o objeto onde se deseja o hidrograma em forma de planilha.
Visualizar Alagamentos	Abre uma janela onde é possível visualizar se houve alagamento nos trechos.

Utilitários:

Curvas IDF	Apresenta curvas IDF, calcula e plota intensidades máximas, calcula lâmina precipitada acumulada e desagregada.
Cálculo do CN	Calcula o valor de CN para bacias rural e urbana/suburbana.

Janelas:

Organiza em Cascata	Arruma, em cascata, as janelas de Projeto abertas.
Organiza Horizontalmente	Arruma, horizontalmente, as janelas de Projeto abertas.
Organiza Verticalmente	Arruma, verticalmente, as janelas de Projeto abertas.
Nome da Janela	Mostra as janelas abertas.

Ajuda:

Idioma	Habilita o idioma (português)
Sobre o Sistema	Descrição sumária do sistema e da equipe de desenvolvimento.
Histórico	Relato histórico das versões anteriores do IPHS1, bem como *bugs* já identificados e resolvidos.

Ajuda	Contém um Manual resumido do IPHS1 para *Windows*.

2.3.3 Opções da Barra de Ferramentas Principal

	Cria um novo projeto
	Abre um projeto existente
	Salva o projeto ativo
	Assistente de preenchimento de dados da rede
	Bloqueia ou desbloqueia a rede
	Mostra ou não os trechos de água
	Mostra ou não a imagem de fundo
	Mostra o gerenciador de objetos
	Faz um diagnóstico geral do objeto
	Inicia uma simulação
	Distribui as janelas em cascata
	Distribui as janelas horizontalmente
	Distribui as janelas verticalmente
	Sistema de ajuda

2.3.4 Opções da Barra de Ferramentas Hidrográficas

	Aciona o estado de seleção de objetos da Rede Hidrográfica.
	Cria uma Sub-bacia ligada a um PC ou a um Trecho de Água
	Cria um PC – Ponto de Controle.
	Cria um Reservatório.
	Cria uma Derivação ligada a um PC.

	Remove o Objeto selecionado.
	Criar um trecho de rio ligando dois pontos de controle
	Inserir um ponto de controle entre dois PCs
	Substitui um ponto de controle em reservatório
	Substitui um reservatório em um ponto de controle

2.4 Operação do IPHS1

2.4.1 Inicialização do programa

Para dar início a uma sessão de uso do IPHS1 o usuário poderá fazê-lo através de quaisquer dos métodos usuais de abertura de um programa no Windows 95/98, NT, 2000 e XP, selecionando seu ícone (com duplo clique) a partir do:

- Menu Iniciar;
- Explorer (Gerenciador de Arquivos) – no diretório escolhido para a instalação;
- Na Área de Trabalho – caso tenha preferido criar um atalho do aplicativo neste local.

Ao ser iniciado o programa apresenta ao usuário a tela ilustrada na Figura 2.3.

A utilização do programa será feita, então, conforme já mencionado, a partir de operações centradas em um Projeto, o que consiste no lançamento de Elementos Representativos de Operações Hidrológicas, sejam eles *isolados* ou na forma de uma *Rede Hidrográfica* (rede de elementos físicos, tais como PCs, Reservatórios, Trechos de Água e Derivações), na execução da Simulação (execução do IPHS1 DOS) e, depois, na análise dos resultados.

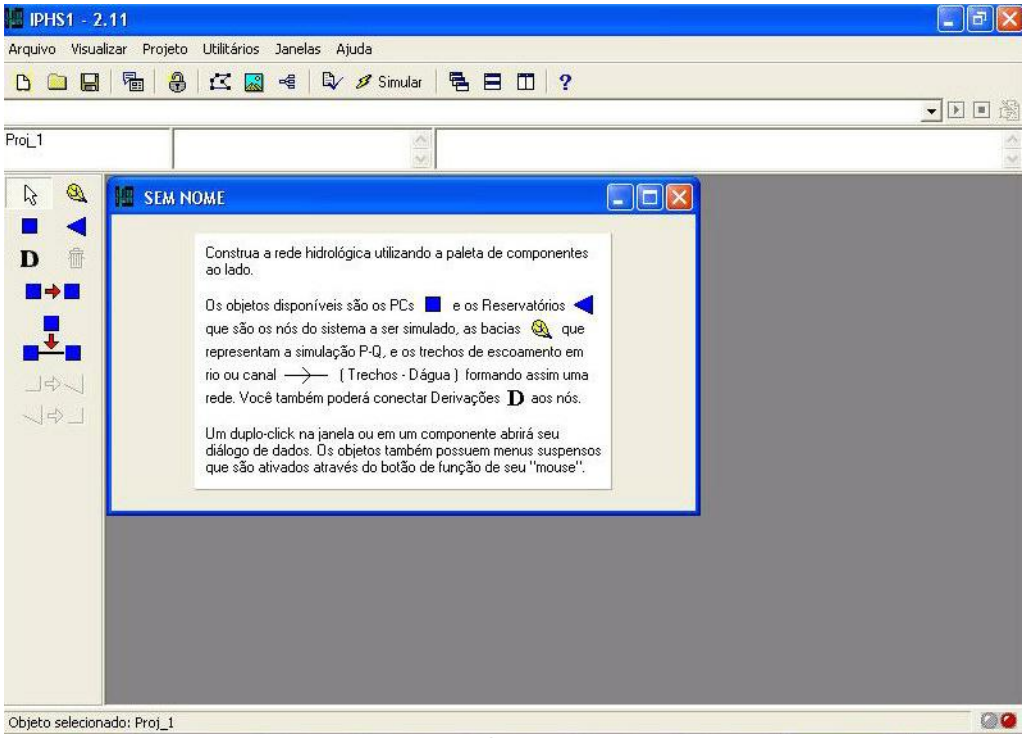

IPHS1 - 2.11
Arquivo Visualizar Projeto Utilitários Janelas Ajuda
Simular
Proj_1
SEM NOME
Construa a rede hidrológica utilizando a paleta de componentes ao lado.
Os objetos disponíveis são os PCs e os Reservatórios que são os nós do sistema a ser simulado, as bacias que representam a simulação P-Q, e os trechos de escoamento em rio ou canal (Trechos - Dágua) formando assim uma rede. Você também poderá conectar Derivações D aos nós.
Um duplo-click na janela ou em um componente abrirá seu diálogo de dados. Os objetos também possuem menus suspensos que são ativados através do botão de função de seu "mouse".
Objeto selecionado: Proj_1

Figura 2.3. Área de projeto.

2.5 Criação, abertura, edição e fechamento de um projeto

2.5.1 Criando e Salvando um novo Projeto

Para criar um projeto novo o usuário deverá proceder da seguinte forma:

- Escolher a opção Novo (Ctrl + N) do Menu Arquivo ou o ícone correspondente na Barra de Ferramentas Principal.

O acionamento desta opção fará com que, imediatamente, seja aberta na tela uma janela denominada Área de Projeto totalmente em branco (Figura 2.3) e que, como já foi dito, deverá ser vista como uma prancheta de desenho onde o usuário irá inserir os elementos representativos de Operações Hidrológicas que desejar estudar.

- Na tentativa de qualquer ação, será exibida a mensagem “Por favor. Salve o projeto primeiro”. Utilizando as opções Salvar e Salvar como..., (Figura 2.4) o usuário deve dar um nome ao arquivo ao Arquivo de Projeto (.iphs1) criado, bem como escolher qual a unidade e diretório de salvamento a serem utilizados. A opção Salvar ou o ícone que lhe correspondo na Barra de

Ferramentas Principal, fará o salvamento automático do arquivo depois que ele já exista em disco. Recomenda-se a criação de uma pasta de trabalho, onde deverão ser salvos todos os arquivos utilizados na simulação.

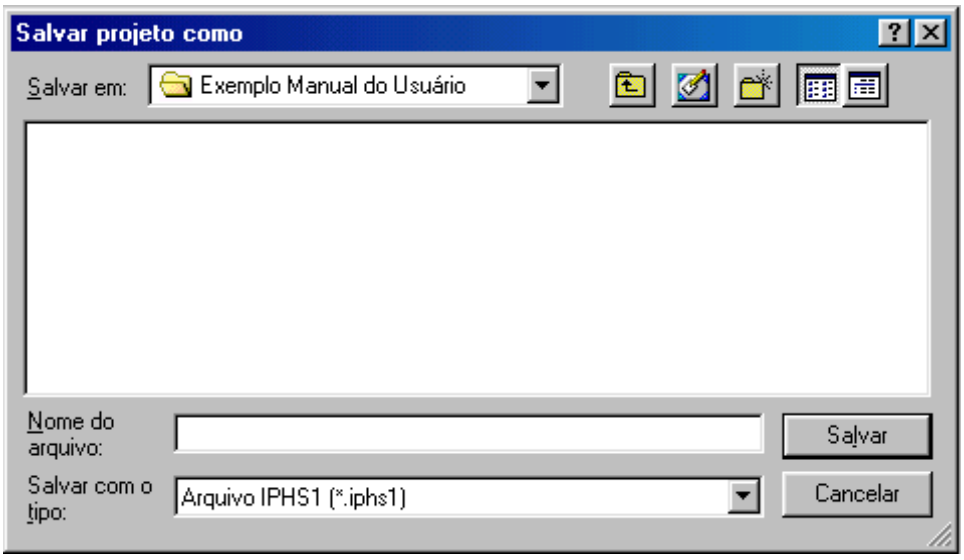


Figura 2.4. Janela de diálogo "Salvar projeto como ...".

O Arquivo de Projeto criado possui todas as informações referentes ao Projeto. Sua estrutura é semelhante aos arquivos ".INI" do *Windows* e está ilustrada na Figura 2.5. Ele será criado na primeira vez que um Projeto for Salvo ou quando ele for salvo, também pela primeira vez, com outro nome de arquivo através da opção Salvar Como... . Nos demais casos, quando for utilizada a opção Salvar, ele será sobrescrito.

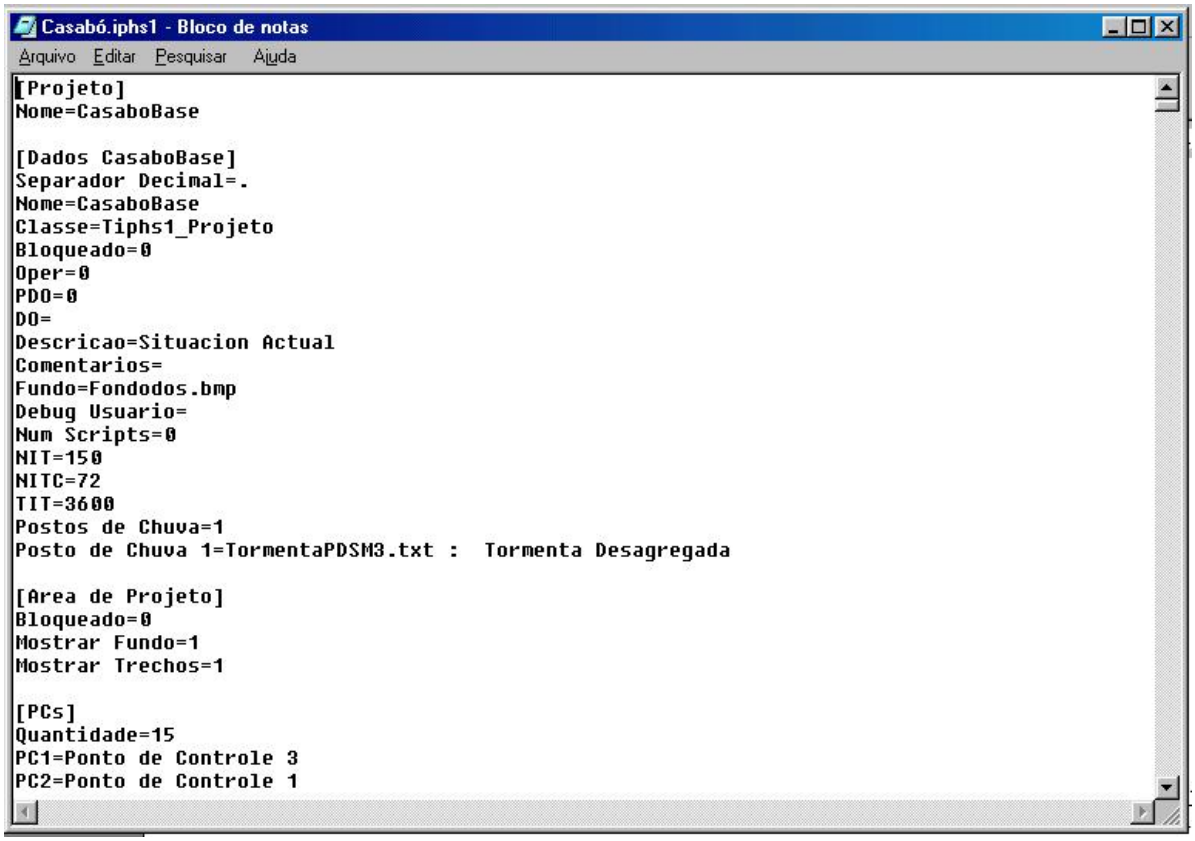


Figura 2.5. Arquivo de Projeto aberto no Editor de Textos do IPHS1.

O IPHS1 gerencia de modo adequado a formatação do Arquivo de Projeto de modo que o usuário deverá evitar editá-lo diretamente. Qualquer edição feita no Projeto e posteriormente salva será registrada no Arquivo de Projeto. Para poder editar diretamente o Arquivo de Projeto o usuário deverá conhecer bem sua estrutura e também a alteração que pretende fazer, caso contrário correrá o risco de danificar o arquivo e perder todas as informações registradas. Assim sendo, é conveniente quando desejar fazer qualquer alteração direta que antes salve uma cópia do arquivo com outro nome.

A prática de realizar frequentes “backups” dos seus Arquivos de Projeto com nomes alternativos é uma boa maneira de evitar perdas irremediáveis.

- Preencher os dados de Identificação do projeto, através da abertura da janela Projeto com um duplo clique sobre a Área de Projeto, ou através do menu Projeto “Editar Dados Gerais...”

A janela Projeto (Figura 2.6) contém um conjunto de campos com dados de documentação e informações necessárias à operação adequada do Projeto.

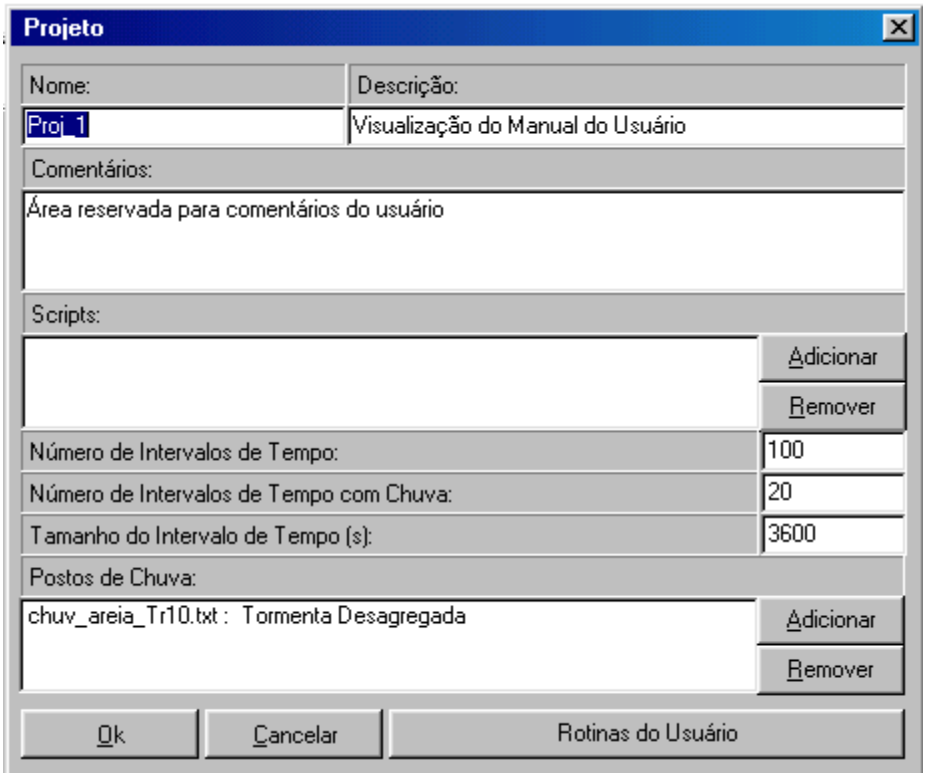


Figura 2.6. Janela de Dados do Projeto.

Os campos *Nome*, *Descrição* e *Comentários* destinam-se, respectivamente, à identificação do Projeto, a uma pequena descrição do mesmo e a quaisquer comentários que sejam necessários para identificar versões, hipóteses, alternativas, etc., de livre escolha do usuário. Pode-se observar que essas informações aparecem, na Figura 2.6, na Caixa de Título Descrição e Comentários.

O campo *Scripts* permite a inserção de rotinas na linguagem *Pascal Script* destinadas a automatizar a análise de resultados. Pode, portanto, ser utilizado por usuários já familiarizados com a linguagem e com as funções disponibilizadas através do *Editor Pascal Script*.

Os campos *Números de Intervalos de Tempo, Número de Intervalos de Tempo com Chuva* e *Tamanho do Intervalo de Tempo* são auto-explicativos sendo que, os dois primeiros são medidos em unidades do último que, por sua vez, deve ser estabelecido em segundos. O *Número de Intervalos de Tempo com Chuva, necessariamente, deverá ser menor ou igual ao Número de Intervalos de Tempo.*

O campo destinado a *Postos de Chuvas* deverá ser editado utilizando-se os botões Adicionar e Remover. O primeiro botão dá acesso a uma janela semelhante à ilustrada na Figura 2.7, de (a) a (c). Nela o usuário poderá:

(a) Selecionar o arquivo de chuva em qualquer diretório correspondente ao *Posto* que desejar (recomenda-se utilizar o mesmo diretório onde foi salvo o projeto) – Figura 2.7 (a);

(b) Digitar os valores de chuva e salvá-los no diretório de trabalho (Figura 2.7 b)). Para realizar isso, será solicitado que seja fornecido valores de precipitação para o número de intervalos de tempo com chuva. Após digitados os valores, bastará fechar a janela no ícone superior à direita. Salve os dados da planilha;

(c) Gerar valores de chuva por IDF (Figura 2.7 c). Ao selecionar esta opção, o programa abrirá a janela Curvas IDF, que é composta por duas "pastas". Uma denominada equações cadastradas e outra denominada estados, estações / localidades e cálculos. Na "pasta" equações cadastradas o programa tem como "default" a equação $I = (aTr^b)/(t+c)^d$. Para inserir uma nova forma de equação IDF, o usuário deverá dar uma denominação a esta no campo destinado ao Nome e, imediatamente, pressionar o botão adicionar. Após, no campo Equação, o usuário poderá inserir a equação IDF usando a linguagem Pascal Script (VIEGAS Fº, 2000). O campo Comentários poderá ser utilizado para documentar a equação inserida, caso o usuário ache necessário.

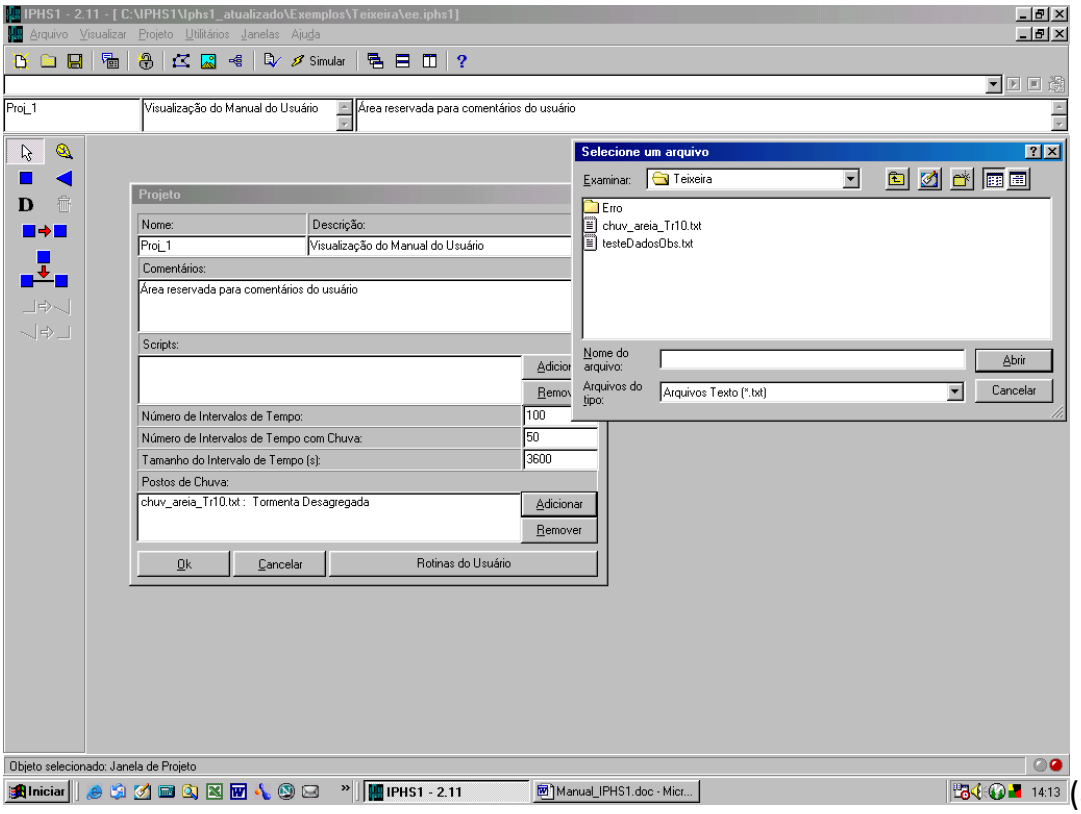
Na "orelha" estados, estações/localidades e cálculos o usuário seleciona o estado do Brasil no qual a localidade que deseja determinar o hietograma de projeto está inserida. Existe ainda a opção de escolha exterior, que se destina a

localidades fora do Brasil. O "default" do programa disponibiliza algumas curvas IDF do estado do Rio Grande do Sul. A inserção de novas curvas IDF para este estado ou para os demais é simples, basta que o usuário selecione o estado de interesse, coloque o nome da estação no campo nome, selecione o tipo da equação e insira os parâmetros da mesma, no campo denominado *Parâmetros.* A ordem de inserção dos parâmetros deve ser a mesma usada quando da definição do tipo de equação. Para a equação que está no "default" do programa devem-se inserir respectivamente os parâmetros a, b, c e d. Uma vez feito isto, basta clicar os botões adicionar e atualizar.

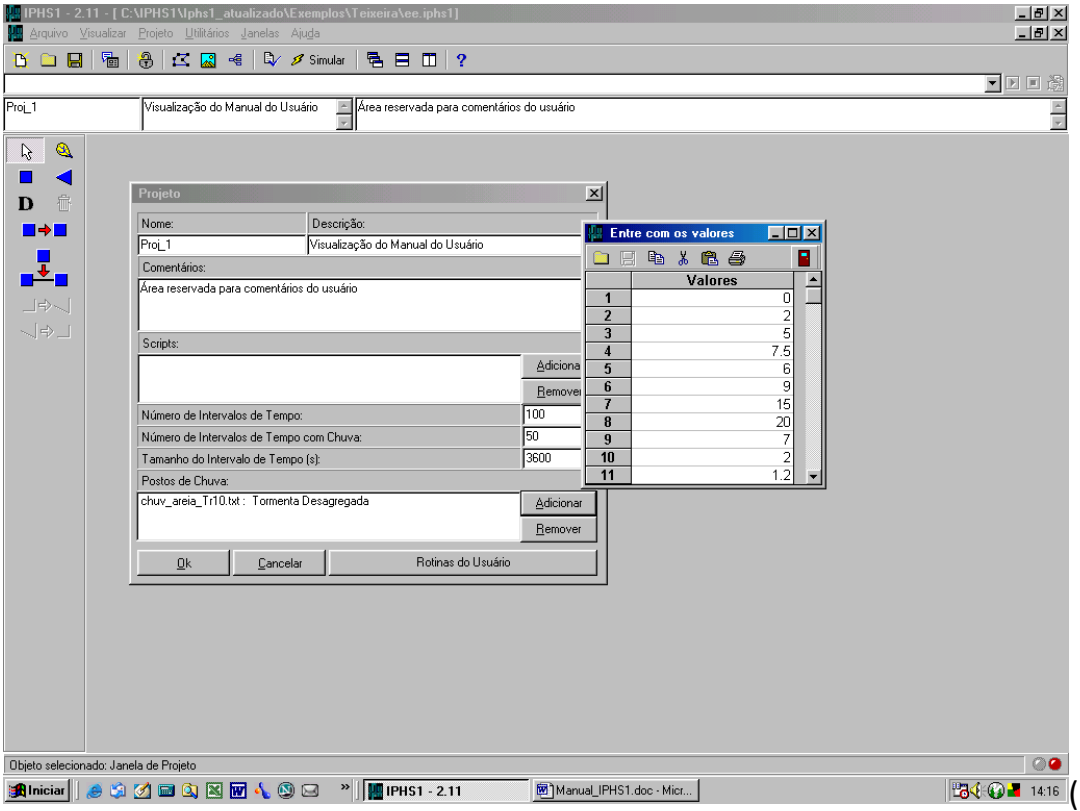
Uma vez definida a equação a ser utilizada para o cálculo da curva IDF e o respectivo hietograma de projeto, o passo seguinte é calcular os valores de intensidades máximas ($mm.h^{-1}$) e de lâminas precipitadas (mm), nas durações e períodos de retorno de interesse. Para tanto, o usuário deve clicar sobre a "orelha" denominada Cálculos e selecionar o tipo de equação. Feito isto, o programa insere automaticamente os parâmetros da equação na respectiva janela. O(s) período(s) de retorno que se deseja determinar os valores de intensidades máximas são inseridos no campo Tr (anos) assim como as durações inicial e final, bem como o incremento entre elas, são inseridos nos campos início, fim e incremento. Fornecidas todas as informações, o usuário deve pressionar o botão calcular que está à direita da tela, para que o programa forneça a tabela das intensidades, o gráfico com as respectivas curvas IDF e as planilhas com as Alturas de Lâminas Acumulada e Desagregada.

Para salvar o arquivo do Posto de Chuva que será utilizado pelo IPHS1, o usuário deverá selecionar o conjunto de dados de Alturas de Lâminas Acumulada ou Desagregada, conforme a sua escolha, e então dar um "clic-simples" sobre o botão salvar, somente uma coluna de dados pode ser salva. Fazendo isto o programa abre a janela, para salvar na forma de arquivo texto, os dados de chuva. Este arquivo consiste de um arquivo texto com tantos

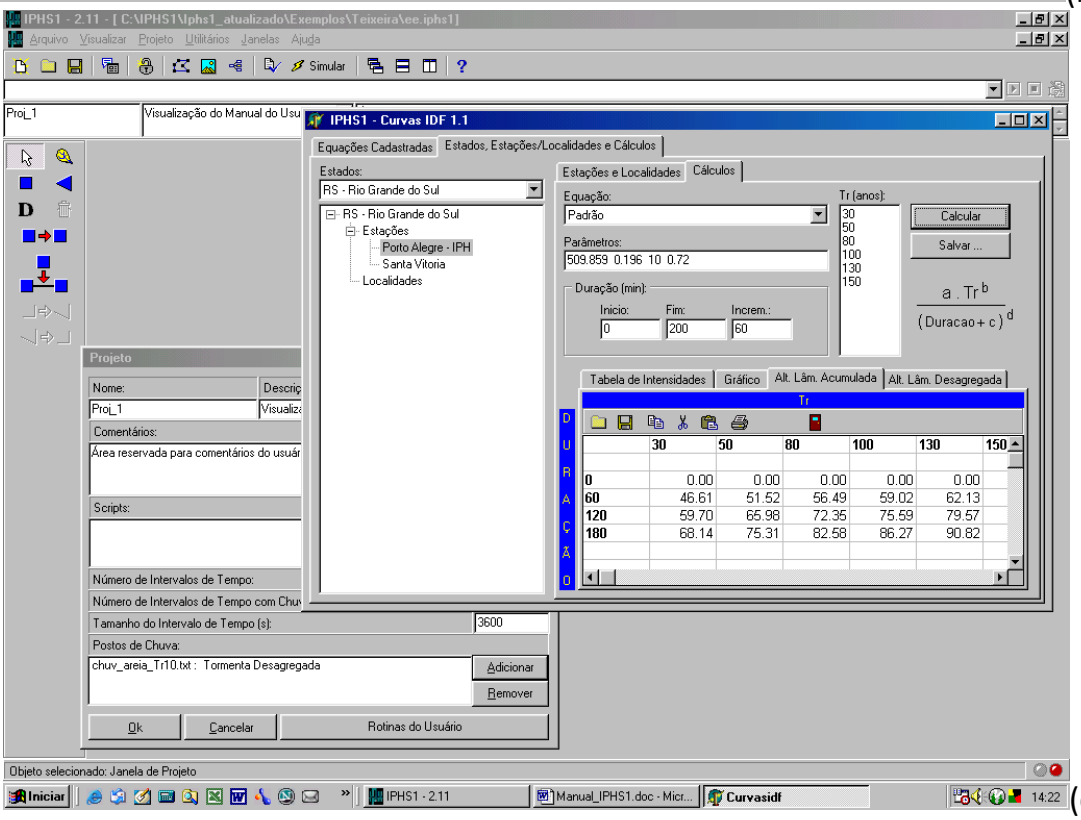
valores quantos os intervalos de tempo com chuvas indicados no campo *Número de Intervalos de Tempo com Chuva*.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.7. Entrada de dados dos postos de chuva.

Para sair desta janela basta clicar no botão do canto superior direito.

Após a inserção de cada posto, o usuário deve indicar se os dados correspondem a uma tormenta de projeto fornecida de forma desagregada ou acumulada. Esta escolha deve ser feita na janela apresentada na Figura 2.8, que é aberta para cada posto em particular.

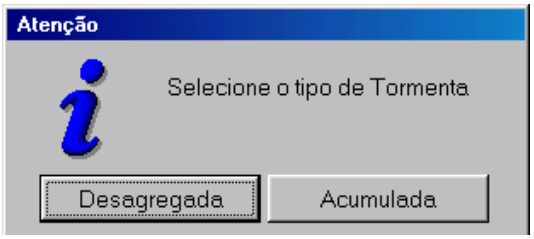


Figura 2.8. Seleção dos tipos de dados de chuva.

O processo deve ser repetido para o número total de postos a serem utilizados na simulação. Para fazer a Edição dos Dados do Projeto, basta abrir novamente a janela, realizar as alterações desejadas e, mais uma vez, teclar OK. Para remover algum posto, basta selecionar o posto e a opção remover.

O botão Rotinas do Usuário, ilustrado na Figura 2.7, possibilita que, após a simulação, seja executada uma rotina em *Pascal Script*. Os usuários familiarizados com a linguagem e com as funções que irão gradativamente sendo disponibilizadas através do *Editor Pascal Script* podem aproveitar sua potencialidade.

2.5.2 Abrindo, Editando e Fechando um Projeto Existente

A abertura de um Projeto existente poderá ser feita do seguinte modo:

Escolher a opção Abrir (Ctrl + A) do Menu Arquivo ou o ícone correspondente na Barra de Ferramentas Principal.

Esta opção abrirá imediatamente uma janela semelhante à da Figura 2.4, só que com a denominação “Abrir Projeto”. O IPHS1 memorizará sempre o último Diretório de Pesquisa utilizado. A partir dele ou de outro que poderá ser selecionado, o usuário poderá abrir o Arquivo de Projeto que desejar.

Este procedimento abrirá imediatamente a janela *Área de Projeto* do Arquivo de Projeto selecionado que, então, poderá ser objeto de edição ou de qualquer procedimento permitido pelo IPHS1.

O usuário poderá ter vários Projetos (ou diferentes versões do mesmo projeto – com denominações e Arquivo de Projeto distintos) abertos simultaneamente, sempre selecionando a janela daquele que desejar que fique ativo para poder realizar qualquer operação sobre o mesmo.

Quando desejar encerrar um Projeto o usuário deverá escolher a opção Fechar do Menu Arquivo. Esta opção irá fechar o Projeto ativo. Caso o Projeto não tenha ainda sido salvo ou caso tenha sofrido alguma alteração o IPHS1 perguntará ao usuário de deseja fazê-lo.

2.6 Criação de Elementos de Operações Hidrológicas ou de uma Rede Hidrográfica

O primeiro passo para a materialização de um Projeto é a inserção dos elementos que irão constituir as Operações Hidrológicas que se deseja estudar. Essas operações podem ser isoladas ou, então, pertencerem a uma Rede Hidrográfica. Isso é feito através do lançamento sobre a Área de Projeto dos elementos físicos que constituem essa rede: Pontos de Controle, Trechos de Água, Reservatórios, Sub-bacias e Derivações.

O Módulo Rio (correspondendo à propagação em canais e soma de hidrogramas), conforme ilustrado na Tabela 2.1, compõe a maioria dos elementos representativos das Operações Hidrológicas. Seus elementos são os Pontos de Controle, Reservatório, Trecho d'água e as Derivações. Já o Módulo Bacia, consistindo na transformação precipitação-vazão na superfície da bacia, está representado pelo elemento Sub-bacia.

Tabela 2.1. Funções dos elementos representativos das Operações Hidrológicas

Elemento	Operação Hidrológica Associada
Ponto de Controle	Soma de Hidrogramas (Módulo Rio).
Reservatório	Propagação de Vazões em Reservatórios (Módulo Rio).
Derivação	Derivação de vazões através de um canal (Módulo Rio).
Trecho d'água	Propagação de Vazões em Canais (Módulo Rio).
Sub-bacia	Transformação Precipitação-Vazão (Módulo Bacia).

2.6.1 Lançamento das Operações Hidrológicas sobre a Área de Projeto

O conjunto de Operações Hidrológicas a serem estudadas, seja de forma isolada, seja na forma de uma Rede Hidrográfica, é constituído por Pontos de Controle, Reservatórios, Sub-bacias, Trechos de Água e Derivações.

É fundamental, entretanto, que o usuário saiba com clareza o que esses elementos representam em termos de Operações Hidrológicas. A Tabela 2.1 tem esse propósito. Recomenda-se uma leitura de Tucci *et al.* (1989) para o perfeito entendimento dos conceitos que envolvem cada Operação Hidrológica e dos modelos capazes de representá-las.

Para tornar possível e fácil o lançamento desses elementos o IPHS1 coloca à disposição do usuário a Barra de Ferramentas Hidrográfica, localizada à esquerda da Janela Principal, conforme a Figura 2.1 e descrita no item 2.3.1.

O procedimento a ser adotado é o seguinte:

1. Começar pela inserção dos PCs e Reservatórios. Para tanto, o usuário deverá selecionar na Barra de Ferramentas Hidrográficas um desses objetos – PC ou Reservatório - pressionando o botão esquerdo do mouse com o ponteiro sobre o seu ícone; o objeto selecionado ficará com seu ícone destacado. Depois é só colocar o ponteiro do mouse em qualquer posição sobre a Área de Projeto e tornar a pressionar o botão esquerdo do mouse. Essa ação poderá ser

continuada e a cada vez um PC ou Reservatório será inserido na Área de Projetos.

O procedimento acima permitirá que o usuário crie todos os Pontos de Controle e Reservatórios que desejar. A inserção poderá ser feita em qualquer ordem, entretanto, para facilitar a organização do Projeto sugere-se que isso seja feito de montante para jusante.

É necessário que se diga que, mesmo para uma operação hidrológica simples de transformação precipitação-vazão em uma Sub-bacia, torna-se necessária à existência de pelo menos um Ponto de Controle que possa receber essa Sub-bacia. Nesse caso, o Ponto de Controle terá apenas a finalidade de receber a Sub-bacia e a operação hidrológica que ele representa, ou seja, a soma de hidrogramas - na medida em que existe apenas um hidrograma: o da própria Sub-bacia - será desconsiderado.

A Figura 2.9 ilustra os primeiros passos para a construção de uma rede. Primeiro foram colocados os PCs (PC1 e PC2) e o Reservatório (PC3), nesta ordem. O passo seguinte é a ligação com Trechos de Água conforme descrito abaixo.

2. Para a ligação dos PCs/Reservatórios com Trechos D'água deverá ser selecionado na Barra de Ferramentas Hidrográfica o ícone de "criar um trecho de rio ligando dois pontos de controle". Isso feito, o usuário selecionará o primeiro PC (ou Reservatório) de montante e depois o PC (ou Reservatório) de jusante do Trecho D'água que deseja inserir. Imediatamente o Trecho D'água será inserido. O usuário deverá observar a correção da direção de fluxo pela direção da seta contida no objeto Trecho D'água.

   A ação acima pode ser continuada até que todos os Trechos D'água tenham sido inseridos. No caso da Figura 9 foi inserido primeiro o Trecho D'água TA1, ligando o PC1 ao PC2, e depois o Trecho D'água TA2, ligando o PC2 ao PC3. O passo seguinte correspondeu à inserção das Sub-bacias.

3. Para a inserção de Sub-bacias ou de Derivações. Para inserir uma sub-bacia ou derivação, o usuário deverá fazer a seleção do ícone Sub-bacia ou Derivação, na Barra de Ferramentas Hidrográficas e, após, clicar em cada PC pressionando o botão esquerdo do mouse com o ponteiro sobre o mesmo. Isso fará com que um ícone Sub-bacia ou da Derivação apareça junto ao PC, ligado a ele por uma linha tracejada (sub-bacias B1 a B4, na Figura 2.9). Uma única sub-bacia também pode estar ligada a um trecho d'água, conforme a Figura 2.9 (sub-bacia B3); esta operação não é permitida para o caso da Derivação que pode ser conectada a um PC.

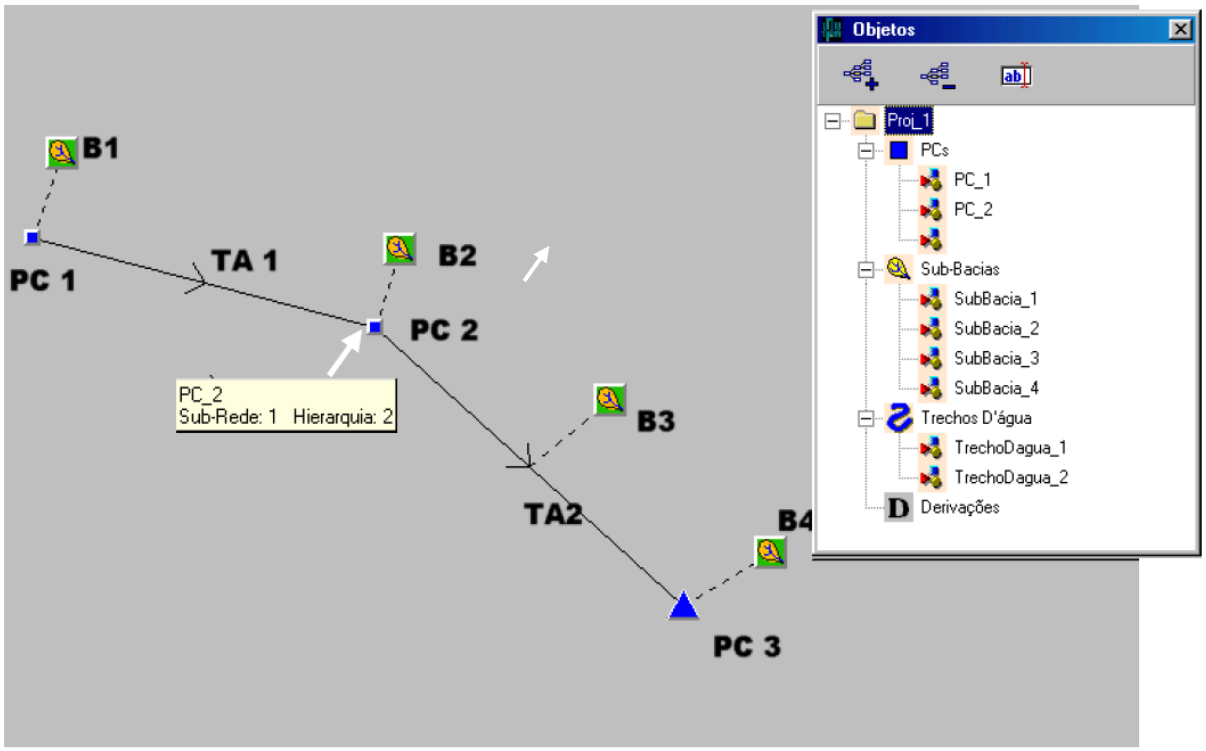


Figura 2.9. Lançamentos de elementos representativos de Operações Hidrológicas na Área de Projeto.

2.7 O Gerenciador de Projeto

O Gerenciador de Projeto é uma das ferramentas de manuseio e controle dos objetos que compõe o Projeto. Conforme já mencionado anteriormente, a janela do

Gerenciador de Projeto contém, na forma de árvore, a descrição estruturada de todos os elementos que compõem o *Projeto*, divididas em: PCs, Sub-bacias, Derivações e Trechos D'água.

Na Figura 2.9, acima, ao lado dos PCs, Sub-bacias e Trechos D'água inseridos na Área de Projeto, está aberto o Gerenciador de Projeto. Nele pode-se ver, parcialmente, na árvore, os Nomes do objetos ligados aos ramos que lhes correspondem. Assim, ao ramo dos PCs, estão ligados o PC_1, PC_2 e RES_1 (Reservatório); ao ramo das Sub-Bacias, as Sub-Bacia_1, Sub-Bacia_2, Sub-Bacia_3 e Sub-Bacia_4; e, ao ramo do Trechos D'água o TrechoDagua_1 e TrechoDagua_2. Estes sãos os Nomes "defaults" dados pelo IPHS1 aos objetos criados e que o usuário pode editar livremente como será visto a seguir.

Quando um objeto é selecionado na Área de Projeto, automaticamente ele também fica selecionado no Gerenciado de Projeto e vice-versa. Isso facilita a identificação dos objetos tanto no que diz respeito ao seu posicionamento na Rede como também quanto ao seu Nome. Conforme se verá a seguir, para se proceder a *edição* dos Dados de um Objeto pode-se dar um "duplo-clique" sobre o mesmo na Rede ou, então, selecioná-lo também com um "duplo-clique" – na Rede ou no Gerenciador de Projeto – e pressionar o ícone (ver Figura 2.9).

Os ícones e servem para reduzir e expandir os ramos da árvore no Gerenciador de Projeto.

2.8 Edição de Elementos do Módulo Bacia e do Módulo Rio

A edição de cada um dos elementos que compõe o Módulo Rio (Ponto de Controle, Reservatório, Trecho de Água e Derivação) ou o Módulo Bacia (Sub-bacia) permite introduzir no sistema as informações necessárias à execução dos modelos hidrológicos necessários à obtenção dos hidrogramas de projeto referentes a cada

operação hidrológica por eles representadas. Abaixo é dada a explicação de como o usuário deve proceder em cada caso.

2.8.1 Edição de Pontos de Controle (Módulo Rio)

Os Pontos de Controle, conforme já mencionado acima, correspondem ao Módulo Rio e sua principal finalidade é propiciar a soma de hidrogramas de outras operações hidrológicas que lhe fiquem imediatamente à montante. Pode-se ter ligado a um Ponto de Controle: uma ou mais Sub-bacias - representando o processo de transformação precipitação-vazão na superfície da bacia -, um ou mais Trechos de Água que lhe fiquem à montante e um Trecho de Água à jusante - que representam a propagação em canais - e uma Derivação.

A Edição dos Dados dos Pontos de Controle é feita como se segue:

1. Dá-se um “duplo clique” com o ponteiro do mouse sobre o PC na Área de Projeto ou, então, através do ícone apropriado do Gerenciador de Projeto. Com isso é aberta a janela “PC” ilustrada pela Figura 2.10.
2. Aberta a janela, o usuário poderá editar os campos Nome, Descrição e Comentários.

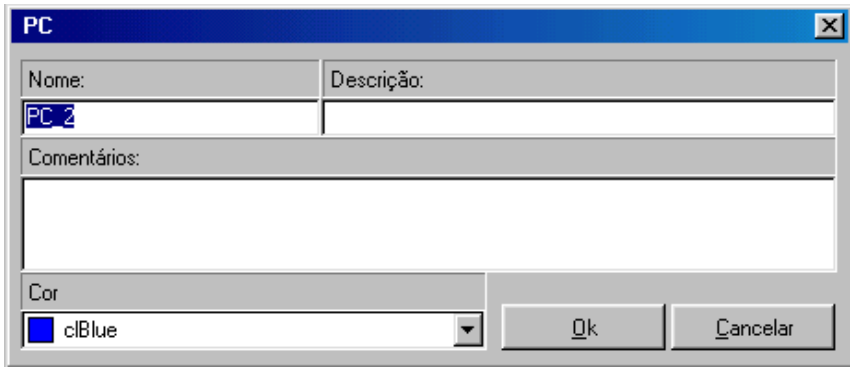


Figura 2.10. Janela "Dados de um PC".

2.8.2 Edição de Sub-bacias

O Módulo Bacia é representado pelo Elemento Sub-Bacia e pelo seu ícone correspondente, representando a operação de transformação precipitação-vazão na superfície da bacia.

A Edição de Sub-bacias é feita do seguinte modo: dá-se um “duplo clique” com o ponteiro do mouse sobre a Sub-bacia na Área de Projeto ou, então, através do ícone apropriado do Gerenciador de Projeto. Com isso é aberta a janela “Sub-Bacia”, ilustrada pela Figura 2.11.

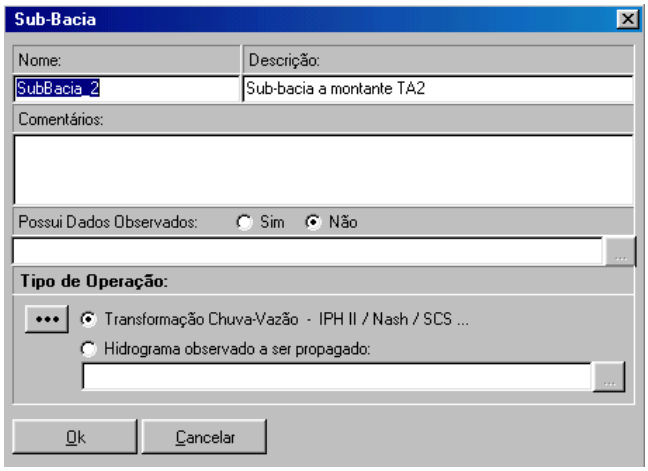


Figura 2.11. Janela "Dados de uma sub-bacia".

Nessa janela são editados, além dos campos Nome, Descrição e Comentários, também a informação da existência ou não de dados observados. Os dados observados servirão para a comparação com o hidrograma calculado, não fazendo parte da simulação.

Adicionalmente, o usuário deverá selecionar ou a opção “Transformação Chuva-Vazão” ou “Hidrograma observado a ser propagado”. A primeira delas habilita o acesso a uma segunda janela, ilustrada pela Figura 2.12, a qual possibilita a inserção e edição de dados básicos da bacia e a seleção dos modelos a serem utilizados para a separação do escoamento e para a propagação do escoamento superficial na bacia. O

usuário deve escolher a segunda opção no caso de já possuir dados referentes à transformação precipitação-vazão, na forma de um arquivo texto (hidrograma observado a ser propagado), onde as vazões, em número igual ao mencionado no projeto como *Número de Intervalos de Tempo*, são colocadas em formato livre.

Escolhida a opção "Transformação Chuva-Vazão", o usuário, clicando com o ponteiro do mouse no botão à esquerda desse campo, terá acesso à outra janela com essa denominação, ilustrada pela Figura 2.12.

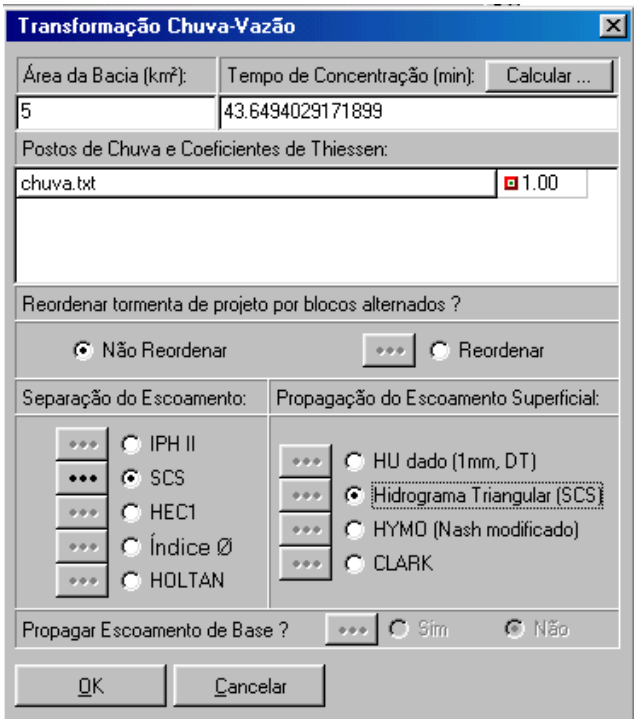


Figura 2.12. Janela "Transformação Chuva-vazão".

Nessa janela, o usuário precisa informar a Área da Bacia, em km^2, e o Tempo de Concentração, em minutos Caso o usuário não conheça o tempo de concentração, o programa permite que esse cálculo seja realizado mediante a Equação de Kirpich. Para tanto, basta pressionar com o ponteiro do mouse o botão na parte superior à direita da janela da Figura 2.12 e terá acesso a outra janela, denominada Cálculo do

Tempo de Concentração (Figura 2.13). Nessa janela deve-se informar o comprimento do Rio Principal em km e o desnível em m.

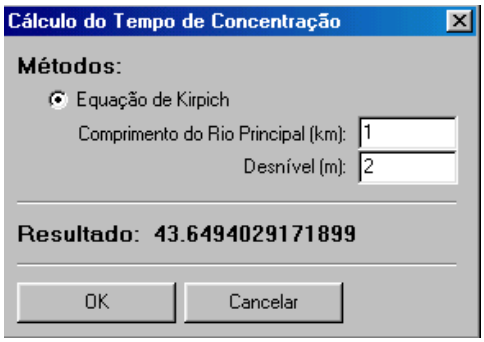


Figura 2.13. Janela para o cálculo do tempo de concentração por Kirpich.

Os postos de chuva que foram inseridos na janela Projeto (Figura 2.6) aparecem na janela de transformação chuva-vazão, onde o usuário deverá inserir o coeficiente de Thiessen correspondente a cada posto, lembrando que a soma total destes coeficientes deve ser a unidade.

É solicitada a informação quanto a Tormenta de Projeto ser ou não reordenada por blocos alternados. O usuário escolherá a opção Reordenar quando a precipitação é obtida de curvas IDF, e Não-Reordenar quando a precipitação possui uma determinada ordenação definida pelo usuário.

Caso a opção Reordenar tenha sido escolhida, o usuário deve fornecer o tempo do pico da duração da precipitação. O valor a ser escolhido pelo usuário será 25, 50 ou 75% da duração da precipitação. Isso é feito através da janela auxiliar Tormenta Reordenada, ilustrada pela Figura 2.14.

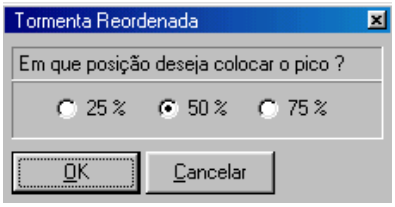


Figura 2.14. Ordem da chuva segundo Método dos blocos alternados.

A separação do escoamento e a propagação do escoamento superficial deverão ter seus métodos escolhidos, conforme apresentados a seguir.

Separação do Escoamento - Método IPHII

Selecionada esta opção o usuário terá acesso à janela "IPHII", ilustrada na Figura 2.15, onde deverá informar a Capacidade de Infiltração, I_0 (mm/h), para t=0, a Capacidade de Infiltração Mínima, IB (mm/h), o parâmetro H, a Capacidade Máxima do Reservatório Superficial, RMAX (mm), fração de Área Impermeável na bacia (entre 0 e 1) e a Vazão de Base Específica no início da chuva ($m^3/s/km^2$). Quando é selecionada esta opção, o usuário é avisado de que a este método está vinculada a utilização do método de Clark para a propagação do escoamento, o qual será explicado mais adiante neste manual.

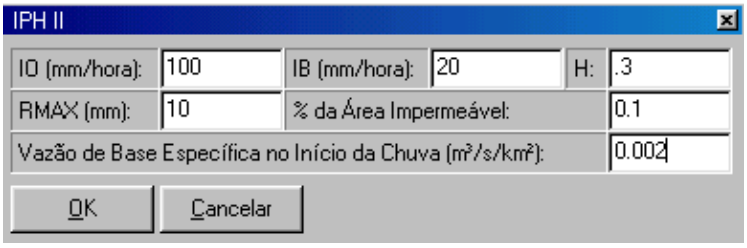


Figura 2.15. Janela do Método IPHII.

Separação do Escoamento - Método SCS

No caso da separação do escoamento ser realizada utilizando-se o Método SCS, o usuário terá duas opções: (a) fornecer diretamente o valor CN; (b) solicitar que o programa calcule o valor de CN.

Caso o usuário escolha a opção (a), bastará inserir o respectivo valor na janela SCS. No entanto, se a opção escolhida for (b), é necessário clicar com o ponteiro do

mouse no botão Calcular, nesse caso, o programa abrirá a janela Cálculo do CN (Figura 2.16).

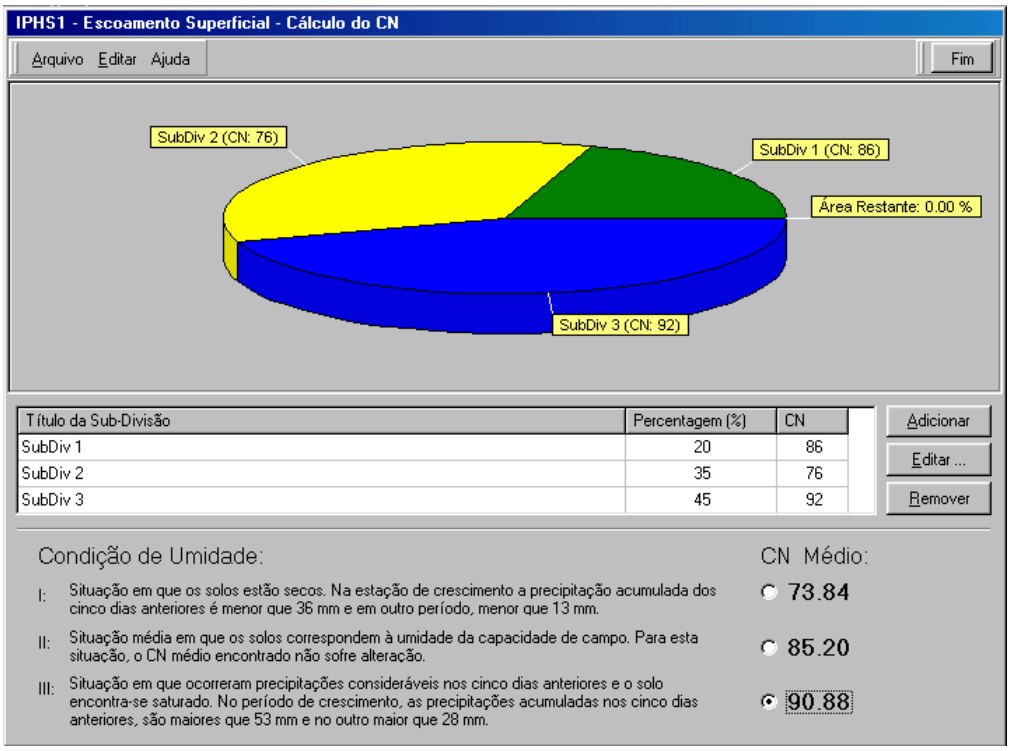

IPHS1 - Escoamento Superficial - Cálculo do CN
Arquivo Editar Ajuda
Fim
SubDiv 2 (CN: 76)
SubDiv 1 (CN: 86)
Área Restante: 0.00 %
SubDiv 3 (CN: 92)
Título da Sub-Divisão
Percentagem (%)
CN
SubDiv 1
20
86
SubDiv 2
35
76
SubDiv 3
45
92
Adicionar
Editar ...
Remover
Condição de Umidade:
CN Médio:
I: Situação em que os solos estão secos. Na estação de crescimento a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm e em outro período, menor que 13 mm.
73.84
II: Situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo. Para esta situação, o CN médio encontrado não sofre alteração.
85.20
III: Situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, são maiores que 53 mm e no outro maior que 28 mm.
90.88

Figura 2.16. Janela de Cálculo do CN.

Clicando em Adicionar abrirá outra janela (Figura 2.17) a qual possui vários campos (Título da Sub-divisão, Percentual e Tipo de Bacia, Uso e Tipo do solo), onde deverão ser inseridos, respectivamente, o nome dado pelo usuário àquela parte da bacia hidrográfica, a percentagem ocupada por esta e a informação quanto ao ser uma bacia rural ou urbana/suburbana. Para preencher os campos referentes ao *Uso do Solo, Superfície e Tipo de Solo*, o usuário dispõe de opções a serem escolhidas dentro de cada um dos respectivos campos. Inseridas essas informações o modelo fornecerá o valor de CN para a subdivisão em questão. O programa fornecerá, ainda, o valor do CN médio da bacia hidrográfica, após terem sido inseridas as informações supracitadas para cada *Subdivisão*.

Deve-se lembrar que a soma dos percentuais das subdivisões deve ser de 100%. O programa está preparado, também, para informar o valor de CN para as situações antecedentes de umidade no solo: de solos secos (AMC I), de solos com a umidade correspondente à capacidade de campo (AMC II) e de solos estão saturados (AMC III), bastando que o usuário selecione qual a Condição Antecedente de Umidade desejada. Ao finalizar o uso do *utilitário* Cálculo do CN o usuário deve clicar sobre a opção FIM (Figura 2.16), e o valor calculado para o mesmo será inserido na janela SCS. O usuário pode também salvar o arquivo onde foi calculado o CN, para isso pode ser utilizada a opção: Arquivo/Salvar.

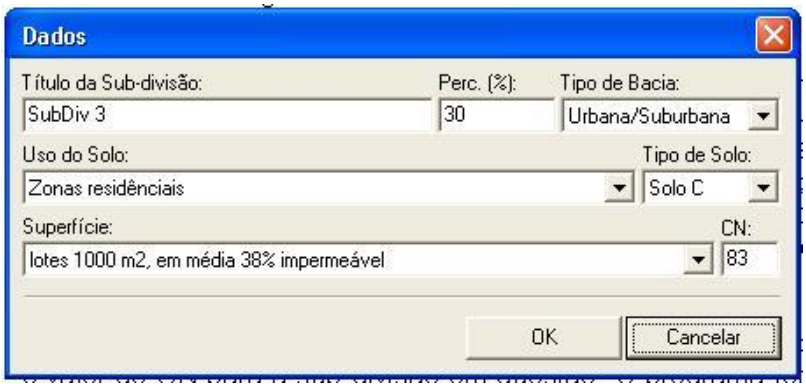


Figura 2.17. Janela para se Adicionar Dados.

Separação do Escoamento - Método HEC1

Se a opção for o Método HEC1, o usuário deverá indicar o Valor Inicial do Coeficiente de Perdas, o valor da Lâmina de Precipitação Limite para incremento do Coeficiente de Perdas, a declividade do Gráfico Semi-Logarítmico e o Expoente da Intensidade da Precipitação, conforme a janela HEC (Figura 2.18).

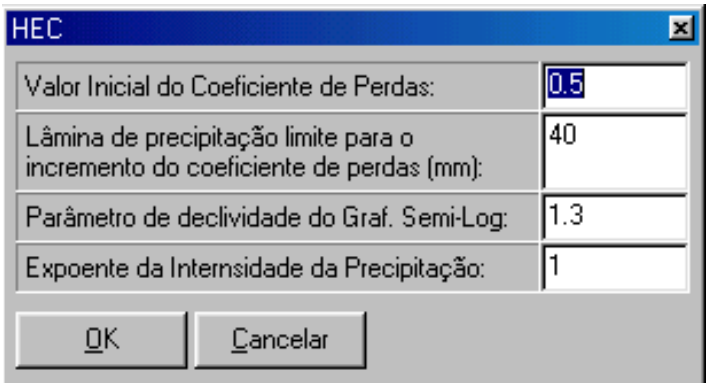


Figura 2.18. Janela do Método HEC1.

Separação do Escoamento - Método FI (Ø)

No caso de uso do Método FI, será indicado através da janela "FI" a Perda Inicial em mm e o Índice FI em mm/h (Figura 2.19).

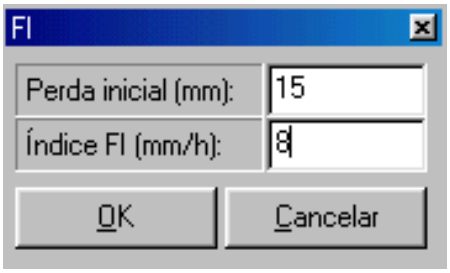


Figura 2.19. Janela do Método FI.

Separação do Escoamento – Método Holtan

O Método de Holtan necessita o Estado Inicial do Reservatório de Umidade do Solo (mm), o Expoente Empírico, a Infiltração Base (mm/h) e a Capacidade de Infiltração Inicial (mm/h), conforme a Figura 2.20.

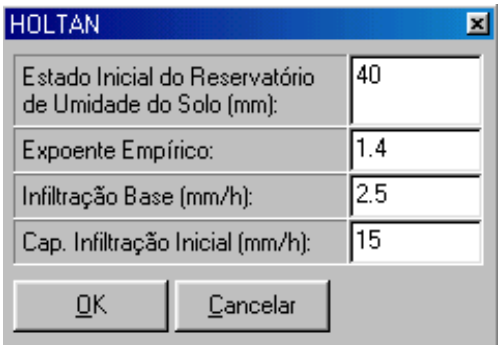


Figura 2.20. Janela do Método Holtan.

Escoamento Superficial – Método HU observado

O usuário pode fornecer as ordenadas de um hidrograma unitário HU [1mm, Δt] observado na bacia. Caso seja essa a opção selecionada para o Escoamento Superficial na janela "Transformação Chuva-Vazão" (Figura 2.12), o usuário deverá utilizar o botão à esquerda do campo selecionado para abrir a janela "HU" (Figura 2.21) e nesta inserir o Número de Ordenadas do HU, bem como seus valores.

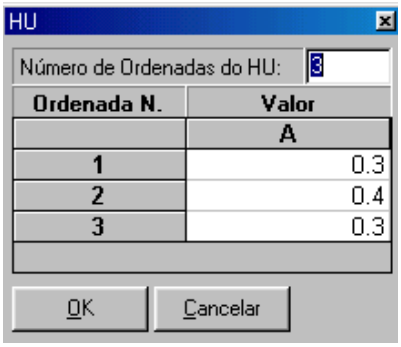


Figura 2.21. Janela do Método HU observado.

Escoamento Superficial – Hidrograma Triangular do SCS

Para utilizar o Hidrograma Unitário Triangular SCS o usuário deverá fornecer a declividade da bacia caso não tenha fornecido o tempo de concentração da mesma. Caso o usuário tenha fornecido o tempo de concentração este campo não estará disponível.

Escoamento Superficial – Método HYMO (Nash Modificado)

Selecionando o Método Nash Modificado o usuário deverá fornecer na janela "HYMO" (Figura 2.22) o valor do parâmetro de retardo do reservatório linear simples k e o tempo de pico do HU em h. No caso desses valores serem desconhecidos o usuário pode fornecer a diferença de nível da sub-bacia e o comprimento do canal principal de modo que aqueles valores possam ser calculados, pelo modelo, em função desses.

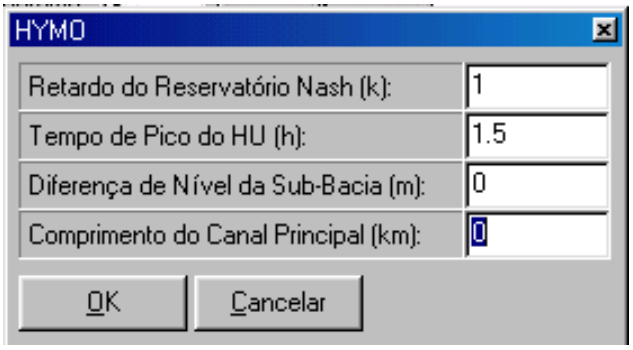


Figura 2.22. Janela do Método HYMO (Nash Modificado).

Escoamento Superficial – Método de Clark

Para utilização do Método de Clark, o usuário deverá fornecer na janela própria (Figura 2.23) o parâmetro KS de retardo do reservatório linear simples em h, o parâmetro XN referente à forma do histograma tempo-área, a declividade da bacia em mm/km (quando o tempo de concentração for fornecido este campo não poderá ser acessado), o número de ordenadas do histograma tempo-área e os seus valores relativamente a uma área unitária.

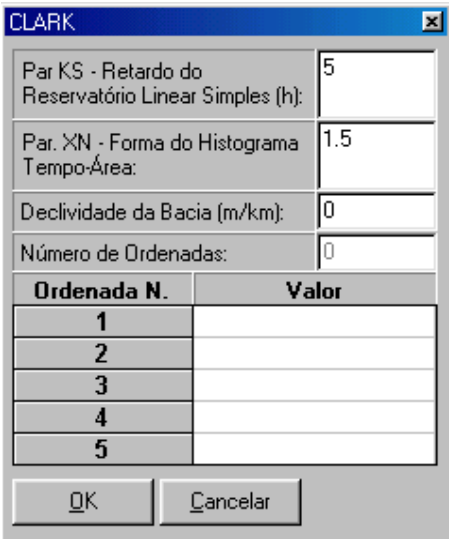


Figura 2.23. Janela do Método de Clark.

E para finalizar as opções da janela Transformação Chuva-Vazão existe a opção Propagar Escoamento de Base, que é habilitado somente quando se utiliza a opção do IPHII.

2.8.3 Edição de Trechos de Água

Como já foi mencionado, os Trechos de Água representam *Operações Hidrológicas* do Módulo Rio, ou seja, de Propagação da Água em Canais.

A Edição de Dados de um Trecho de Água pode ser feita da seguinte forma: dá-se um "duplo clique" com o ponteiro do mouse sobre o trecho d'água na Área de Projeto ou, então, através do ícone apropriado do Gerenciador de Projeto. Com isso é aberta a janela "Trecho D'Água", ilustrada pela Figura 24.

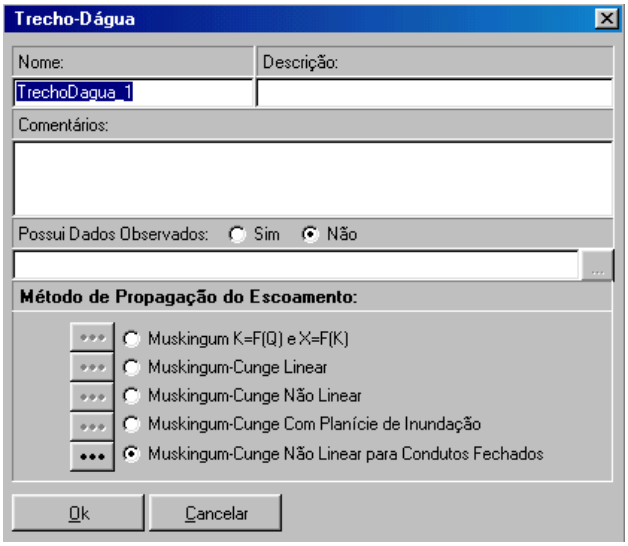


Figura 2.24. Janela da Propagação em Rio.

Aberta a janela, da mesma forma que para os PCs, o usuário poderá *editar* os campos Nome, Descrição e Comentários. Além disso, deverá assinalar "sim", caso hajam dados observados e "não" em situação contrária. Os dados observados não farão parte da simulação, mas poderão ser utilizados para comparar o ajuste com o hidrograma propagado.

O usuário deverá selecionar o Método de Propagação do Escoamento em canais para o Trecho de Água. A Figura 24 ilustra as opções disponíveis e que são: (1) Muskingum, (2) Muskingum-Cunge Linear, (3) Muskingum-Cunge Não-Linear, (4) Muskingum-Cunge com Planície de Inundação e (5) Muskingum-Cunge Não-Linear para Condutos Fechados. Abaixo é apresentado cada um dos casos.

Método de Muskingum

O método de Muskingum necessita que sejam informados os números de pontos da Tabela, os valores do parâmetro X da função X=*f*(Q), o produto do parâmetro V pelo parâmetro K da função K= *f*(Q) e o valor de Q correspondente a ambos. Isso é feito através de uma tabela como a ilustrada na janela "Muskingum K=F(Q) e X=F(Q)" da Figura 2.25.

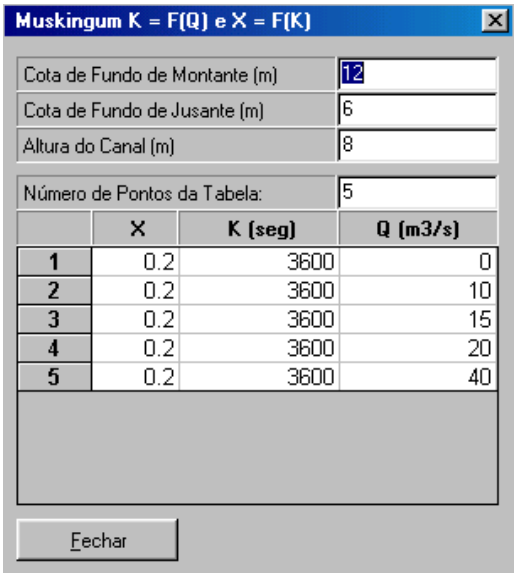


Figura 2.25. Janela da Propagação Método de Muskingum.

Método de Muskingum-Cunge Linear

Para utilizar o Método de Muskingum-Cunge Linear, os dados a serem fornecidos são: o comprimento do trecho de propagação (m), a cota de fundo de montante (m), a cota de fundo de jusante (m), a altura do canal (m), a largura do canal (m), e a rugosidade dos sub-trechos. A vazão de referência, o número de sub-trechos e o intervalo de tempo de cálculo são calculados automaticamente, através da opção automático. O número do hidrograma de contribuição lateral, quando houver, é automaticamente detectado pelo programa de modo que o usuário não tem acesso a este campo (Figura 2.26).

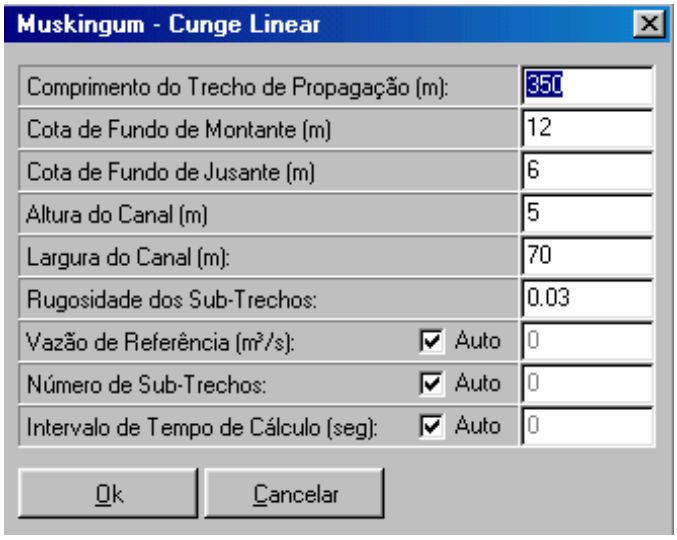

Muskingum - Cunge Linear
Comprimento do Trecho de Propagação (m): 350
Cota de Fundo de Montante (m) 12
Cota de Fundo de Jusante (m) 6
Altura do Canal (m) 5
Largura do Canal (m): 70
Rugosidade dos Sub-Trechos: 0.03
Vazão de Referência (m³/s): Auto 0
Número de Sub-Trechos: Auto 0
Intervalo de Tempo de Cálculo (seg): Auto 0
Ok
Cancelar

Figura 2.26. Janela da Propagação Método de Muskingum-Cunge Linear.

Método de Muskingum-Cunge Não-Linear

O Método de Muskingum-Cunge Não-Linear necessita dos seguintes dados: comprimento do trecho de propagação (m), a cota de fundo de montante (m), a cota de fundo de jusante (m), a altura do canal (m), a largura do canal (m), a rugosidade dos subtrechos, o número de subtrechos e o intervalo de tempo de cálculo. Da mesma forma que no anterior, o número do hidrograma de contribuição lateral, quando houver, é automaticamente detectado pelo programa de modo que o usuário não tem acesso a este campo (Figura 2.27).

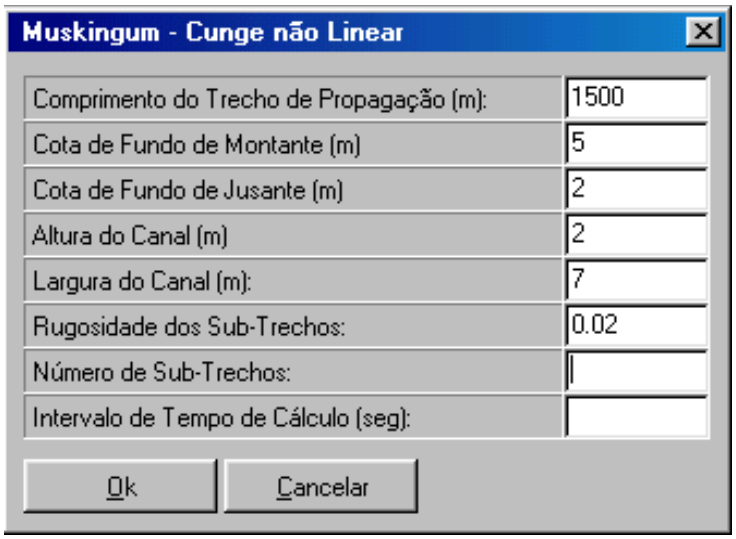

Muskingum - Cunge não Linear
Comprimento do Trecho de Propagação (m): 1500
Cota de Fundo de Montante (m) 5
Cota de Fundo de Jusante (m) 2
Altura do Canal (m) 2
Largura do Canal (m): 7
Rugosidade dos Sub-Trechos: 0.02
Número de Sub-Trechos:
Intervalo de Tempo de Cálculo (seg):
Ok
Cancelar

Figura 2.27. Janela da Propagação Método de Muskingum-Cunge Não-Linear.

Método de Muskingum-Cunge com Planície de Inundação

No Método de Muskingum-Cunge com Planície de Inundação, além dos dados referentes à calha principal (a largura e altura do canal (m), o comprimento do trecho de propagação (m), as cotas de montante e de jusante (m) e a rugosidade), é necessário fornecer as características da calha de extravasamento: altura da planície (m), largura da planície (m) e a rugosidade da planície (Figura 2.28). A vazão de referência, o número de subtrechos e o intervalo de tempo de cálculo são calculados automaticamente, através da opção automática. O número do hidrograma de contribuição lateral, quando houver, é automaticamente detectado pelo programa de modo que o usuário não tem acesso a este campo.

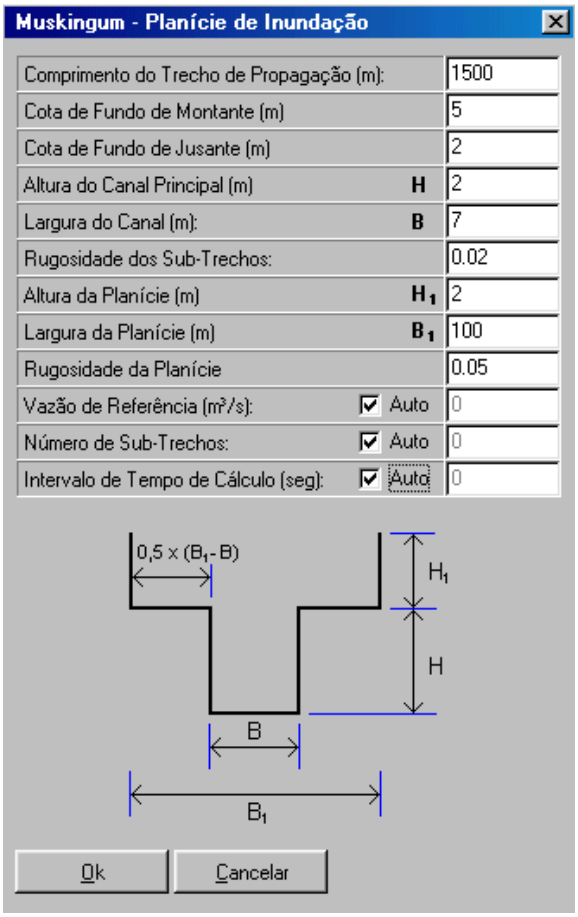

Muskingum - Planície de Inundação
Comprimento do Trecho de Propagação (m): 1500
Cota de Fundo de Montante (m) 5
Cota de Fundo de Jusante (m) 2
Altura do Canal Principal (m) H 2
Largura do Canal (m): B 7
Rugosidade dos Sub-Trechos: 0.02
Altura da Planície (m) H1 2
Largura da Planície (m) B1 100
Rugosidade da Planície 0.05
Vazão de Referência (m³/s): Auto 0
Número de Sub-Trechos: Auto 0
Intervalo de Tempo de Cálculo (seg): Auto 0
0,5 x (B1 - B)
H1
H
B
B1
Ok
Cancelar

Figura 2.28. Janela de Propagação Método de Muskingum-Cunge com planície de inundação.

Método de Muskingum-Cunge Não-Linear para Condutos Fechados

No Método de Muskingum-Cunge para condutos, primeiramente devem ser fornecidos: o comprimento do conduto (m), e as cotas de fundo de montante e de jusante (m). A vazão de referência, o número de sub-trechos e o intervalo de tempo de cálculo são calculados automaticamente, através da opção automático.

Após devem ser inseridas as características do trecho principal (assim chamado, porque conforme descrito a seguir, poderão ser utilizados condutos paralelos ao trecho principal), sendo que podem ser utilizadas as seguintes seções:

- circular: deve ser informado o diâmetro (m) e a rugosidade;
- retangular: devem ser informadas a altura e largura (m), além da rugosidade;
- trapezoidal: informam-se a altura e largura (m), a rugosidade, e os taludes do lado esquerdo e direito (LE e LD).

Conforme mencionado, pode ainda ser utilizada a opção de propagação em conduto paralelo. Podem ser adicionados tantos condutos paralelos quanto forem necessários, bastando para isso colocar o número correspondente na janela ao lado da mensagem "Trechos Paralelos ao Trecho Principal". Depois de inserido o número de condutos paralelos, esta janela habilita a entrada de dados desses condutos. Os condutos em paralelo não necessitam ter mesmo tipo de seção transversal que o trecho principal, assim como podem ser utilizados vários trechos paralelos com diferentes tipos de seções.

A utilização de trechos paralelos pode ser feita quando se quer suprir a falta de capacidade do conduto principal, com a adição de um novo conduto, paralelo ao primeiro; pode ser utilizada também para simular as condições existentes em

determinado sistema de drenagem, onde é comum a ocorrência de redes paralelas; etc.

Existe ainda a opção de Tratamento dos Excessos. Os excessos podem ser:

- Armazenados (opção armazenar): é fornecido um arquivo de alagamentos, onde é informado o volume que não conseguiu entrar no sistema e o tempo em que há este acúmulo.
- Propagação do escoamento na rua (opção propagar superficialmente): propaga do escoamento excedente na rua. Assim, toda a água que não consegue entrar no conduto é propagada pela rua, até encontrar o próximo trecho d'água.
- Redimensionamento: nesta opção o usuário deve escolher qual o tipo de seção que será utilizada como referência para redimensionar. Por ex: se meu conduto principal (1) é um circular, e houver um trecho paralelo (2) retangular e um terceiro trecho paralelo trapezoidal, na hora de solicitar o redimensionamento, as opções serão de redimensionar para um conduto circular, retangular ou trapezoidal. Se o usuário escolhe o circular não é necessário informar nenhuma característica a ser preservada, já que a área depende unicamente do diâmetro. Se o usuário escolher a seção retangular, ele pode selecionar as características geométricas da seção original (altura e/ou largura) que serão alteradas, sendo da mesma forma para os condutos trapezoidais (Figura 2.29).

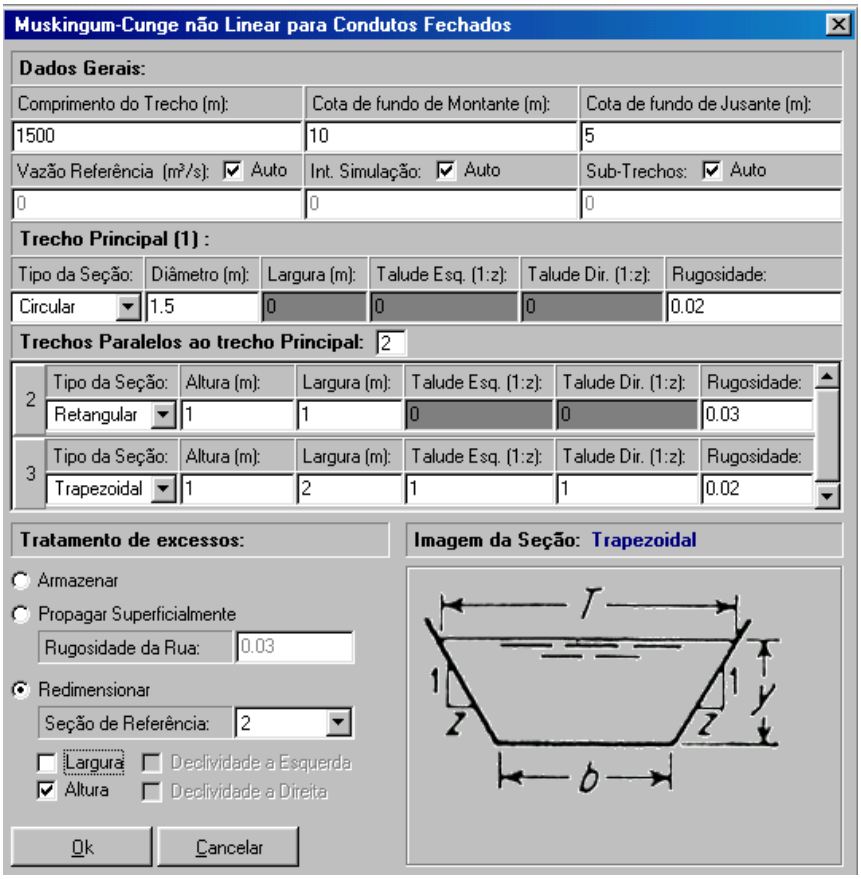


Figura 2.29. Janela de Propagação Método de Muskingum-Cunge Não-Linear em condutos fechados.

2.8.4 Edição de Reservatórios

Os reservatórios correspondem ao Modelo Rio e, neste, a modelagem do amortecimento de ondas de cheia é realizado pelo método de Puls.

A edição de um Reservatório é feita da seguinte forma: dá-se um "duplo clique" com o ponteiro do mouse sobre o Reservatório na Área de Projeto ou, então, através do ícone apropriado do Gerenciador de Projeto. Com isso é aberta a janela "Reservatório", ilustrada pela Figura 2.30.

A edição dos campos Nome, Descrição e Comentários é a mesma indicada no item referente a Edição de Pontos de Controle. A opção "Possui Dados Observados" se assinalada com "sim", conforme já foi mencionado acima, significa que existem dados observados relativos ao hidrograma propagado no reservatório. Nesse caso, o usuário deverá informar qual arquivo contém esses dados. Isso é feito, clicando com o

ponteiro do mouse sobre o botão à direita do campo destinado à inserção do nome do arquivo, o usuário terá acesso a uma janela de seleção de arquivos, semelhante à da Figura 2.4, só que com a denominação “Selecione um Arquivo”, a partir da qual poderá fazer a escolha daquele que contiver os dados observados.

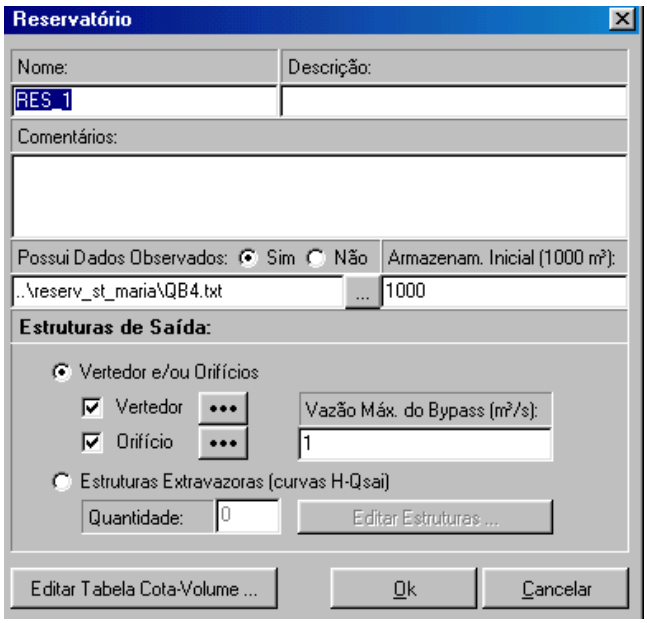


Figura 2.30. Janela para edição de dados de um Reservatório.

Além disso, o usuário deverá informar o armazenamento inicial do reservatório (m^3). O usuário deve selecionar os tipos de estruturas de saída, que podem ser: vertedor e/ou orifício, e estruturas extravasoras.

Quando selecionada a opção vertedor (Figura 2.31) e/ou orifício (Figura 2.32) devem ser fornecidos os dados de cada estrutura.

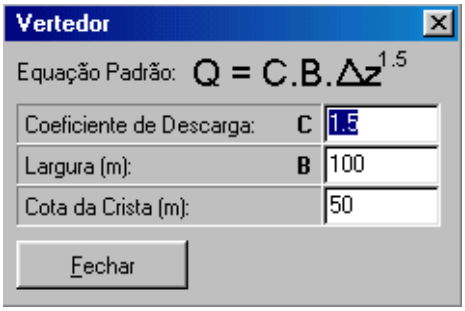


Figura 2.31. Janela de dados do vertedor.

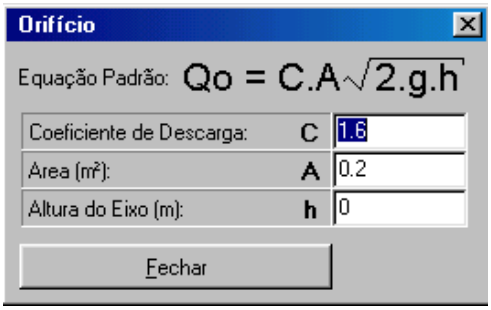


Figura 2.32. Janela de dados do orifício.

Ainda dentro desta opção, o usuário pode utilizar uma estrutura denominada de by-pass, que tem a função de "desviar" um valor de vazão do hidrograma de aporte ao reservatório, antes que ela entre no mesmo, não sendo, portanto, propagada no reservatório.

Quando selecionada a opção estruturas extravasoras, deve ser informada a quantidade de estruturas a serem utilizadas. Após a informação do número de estruturas, clicar no ícone Editar Estruturas. São informados nesta janela (Figura 2.33) o número de cotas, e as vazões de saída correspondentes a cada cota fornecida.

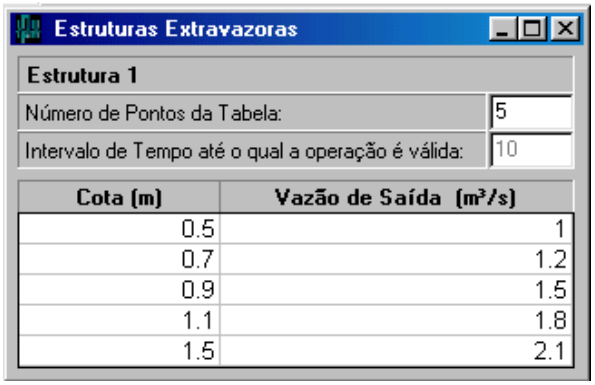


Figura 2.33. Janela de edição das estruturas extravasoras.

2.8.5 Substituição de PCs por Reservatórios e vice-versa

Depois de construída a Rede Hidrográfica, é possível fazer a substituição de um PC por um Reservatório e vice-versa. Para fazer isso é necessário proceder-se da seguinte forma:

Primeiro, seleciona-se o PC ou o Reservatório, depois, clica-se no ícone de substituição ou correspondente. A substituição é automática, no entanto, quando for substituído um PC por um reservatório, não se esquecer de editar os dados do mesmo.

Quando for ao contrário, as informações excedentes (do reservatório) serão perdidas. Nesse caso, se o Projeto não for salvo após a alteração, bastará carregá-lo novamente para voltar à situação anterior, sem perda de informações. Sugere-se que, quando forem feitas alterações desse tipo, com o propósito de serem testadas hipóteses distintas, que cada uma delas seja salva com um Nome de Arquivo de Projeto diferente.

2.9 Clonagem e Cópia de Objetos

Além da criação e da edição, é possível que objetos sejam clonados e/ou tenham seus dados copiados de outros.

A operação de clonagem é realizada apenas sobre PCs e Reservatórios e significa a criação de outro objeto igual, com o mesmo ícone de representação e os mesmos dados. Apenas o nome do objeto é diferente por razões óbvias.

Já, a operação de cópia, é realizada sobre qualquer objeto previamente criado e para o qual são copiados os dados de outro objeto igual. Neste caso específico, é aberta uma janela complementar que pede que o usuário indique de qual objeto os dados serão copiados.

O acesso ao menu (Figura 2.34) que permite essas operações sobre objetos é feito com a utilização do botão direito do mouse sobre um objeto previamente selecionado.

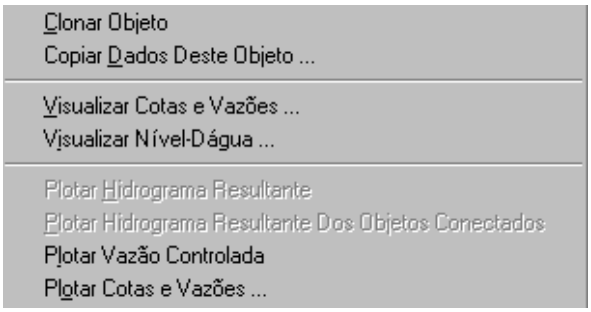

Clonar Objeto
Copiar Dados Deste Objeto ...
Visualizar Cotas e Vazões ...
Visualizar Nível-Dágua ...
Plotar Hidrograma Resultante
Plotar Hidrograma Resultante Dos Objetos Conectados
Plotar Vazão Controlada
Plotar Cotas e Vazões ...

Figura 2.34. Menu de acesso às opções Clonar objeto e Copiar Dados.

2.10 Execução da simulação

Após a inserção dos elementos referentes às *Operações Hidrológicas* a serem estudadas, o próximo passo é a execução da simulação. É o que se verá a seguir.

2.10.1 Diagnóstico Geral do Projeto

Este item está implementado parcialmente, portanto, é importante, como já foi mencionado anteriormente, que o usuário verifique bem todos os seus dados de entrada, não esquecendo que o IPHS1, tal como qualquer sistema ou modelo, ***é uma ferramenta de auxílio a um profissional que saiba o que está fazendo; portanto, ele***

não executa projetos, quem faz isso é o engenheiro, sendo de sua inteira responsabilidade os resultados obtidos e sua aplicação.

Para acionar o comando manual do Diagnóstico o usuário poderá fazê-lo através do Menu Projeto | Realizar Diagnóstico Completo ou então através da opção correspondente na Barra de Ferramentas Principal.

Na parte inferior direita da janela do IPHS1 existem dois sinalizadores na forma de "leds" circulares: quando verde indica que o diagnóstico foi feito de forma satisfatória; quando vermelho indica que existe algum tipo de problema não resolvido (Figura 2.35).

Os problemas que eventualmente venham a ocorrer são automaticamente registrados no Editor de Mensagens. Dessa forma, é possível não apenas verificar o tipo de problemas existentes, mas, inclusive salvar a Mensagem para futuro estudo.

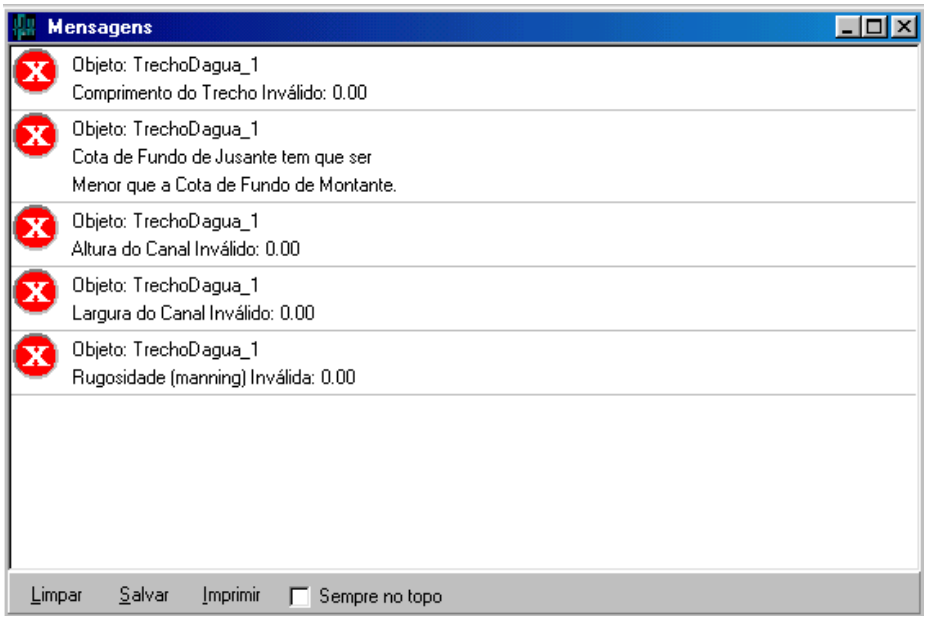


Figura 2.35. Janela indicativa de diagnóstico insatisfatório.

2.10.2 Execução do IPHS1 DOS

Para executar IPHS1 DOS o usuário deverá proceder do seguinte modo:

Selecionar a opção Simular do Menu Projeto ou no ícone correspondente na Barra de Ferramentas Principal. Ao serem acionadas quaisquer das duas opções acima, o IPHS1 irá, primeiro realizar um diagnóstico automático para verificar a existência de alguns erros fatais. Isso feito, o IPHS1 construirá o arquivo de entrada do IPHS1 DOS e o executará (Figura 2.36).

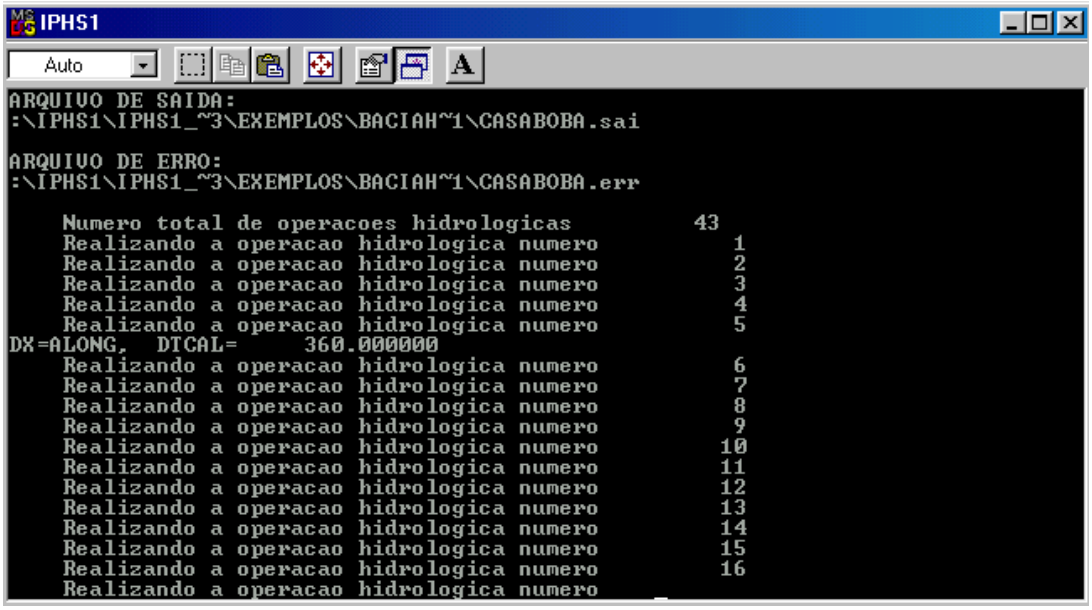

IPHS1
Auto
ARQUIVO DE SAIDA:
:\IPHS1\IPHS1_~3\EXEMPLOS\BACIAH~1\CASABOBA.sai
ARQUIVO DE ERRO:
:\IPHS1\IPHS1_~3\EXEMPLOS\BACIAH~1\CASABOBA.err
Numero total de operacoes hidrologicas 43
Realizando a operacao hidrologica numero 1
Realizando a operacao hidrologica numero 2
Realizando a operacao hidrologica numero 3
Realizando a operacao hidrologica numero 4
Realizando a operacao hidrologica numero 5
DX=ALONG, DTCAL= 360.000000
Realizando a operacao hidrologica numero 6
Realizando a operacao hidrologica numero 7
Realizando a operacao hidrologica numero 8
Realizando a operacao hidrologica numero 9
Realizando a operacao hidrologica numero 10
Realizando a operacao hidrologica numero 11
Realizando a operacao hidrologica numero 12
Realizando a operacao hidrologica numero 13
Realizando a operacao hidrologica numero 14
Realizando a operacao hidrologica numero 15
Realizando a operacao hidrologica numero 16
Realizando a operacao hidrologica numero

Figura 2.36. Janela de execução do IPHS1 DOS.

Ao ser concluída a execução e a janela DOS ser fechada pelo usuário ou automaticamente pelo programa, o Editor de Textos IPHS1 DOS, será imediatamente aberto com o arquivo ASCII de saída da simulação (Figura 2.37).

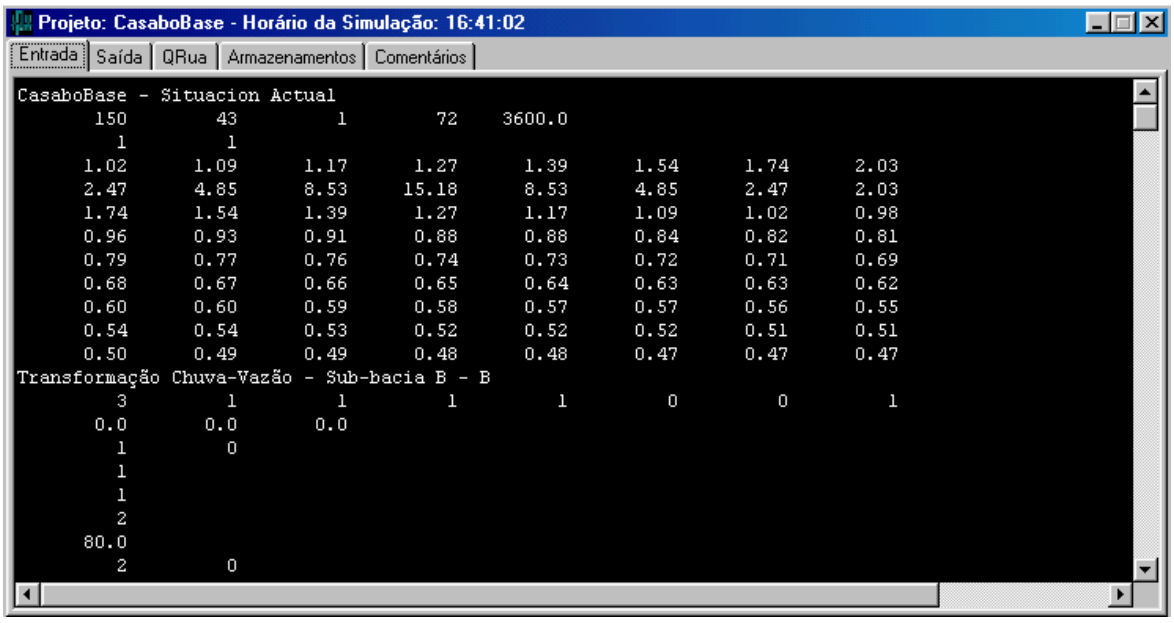


Figura 2.37. Janela de execução do IPHS1 DOS.

No editor estará, também, o arquivo de entrada de dados do IPHS1 DOS, o qual poderá ser consultado, bastando para isso que o usuário selecione a página correspondente na "orelha" superior de documentos do Editor.

2.11 Análise dos resultados e documentação

Conforme foi mencionado no início deste texto, após a execução do IPHS1 DOS, os resultados dele advindos são automaticamente lidos para dentro dos objetos que compõe a Rede Hidrográfica, ficando à disposição do usuário para a realização de análises e a construção de relatórios.

2.11.1 Arquivo ASCII de Saída do IPHS1

A forma tradicional de saída de resultados do IPHS1 DOS é um arquivo texto, no formato ASCII, que contém o histórico completo de toda a simulação (TUCCI *et al.*, 1989). Esse arquivo continua a ser disponibilizado através do Editor de Textos do IPHS1 (Figura 2.34), sendo aberto automaticamente após o encerramento de cada execução do programa. O usuário pode salvar o arquivo com a designação que

desejar, inclusive associando-o, para melhor documentação, a um arquivo de projeto (.iphs1).

2.11.2 Resultados em formato de planilhas e gráficos

Os resultados de uma simulação são possíveis de serem visualizados, também, através de um conjunto de saídas na forma de planilhas - compatíveis com o formato do Excel - e na forma de gráficos. A forma geral de acesso a essas ferramentas de saída é alcançada com o usuário posicionando o apontador do mouse sobre qualquer elemento do projeto (PC, Reservatório, Trecho D'água ou Derivação) e clicando o botão direito do mesmo.

Esse procedimento dá acesso aos menus representados na Figura 2.38. Nela estão representadas todas as seleções possíveis com as suas respectivas opções de menu.

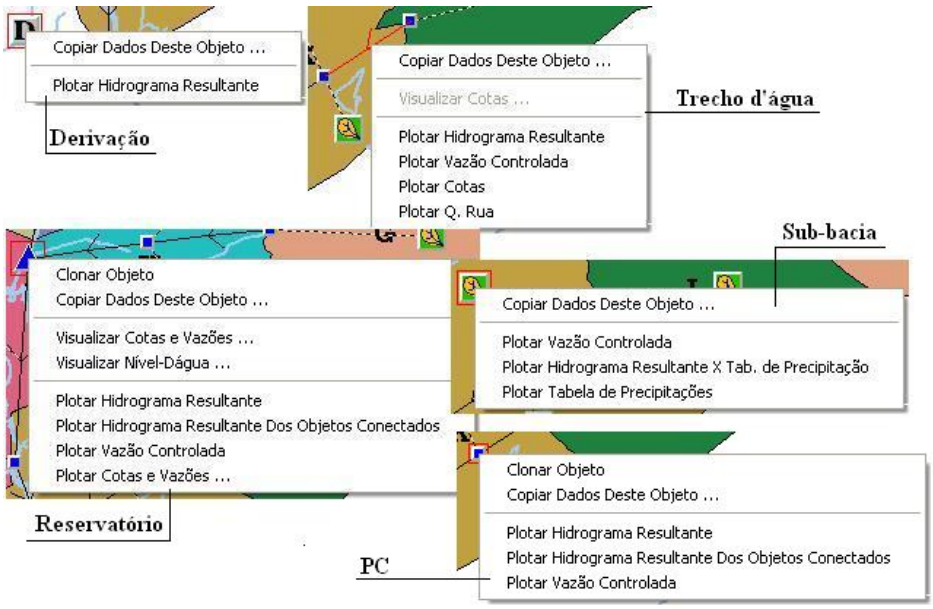


Figura 2.38. Menu de acesso aos resultados em planilhas e gráficos.

Gráficos e Planilhas da Sub-bacia

No caso de uma sub-bacia, as opções disponíveis são: "Plotar vazão controlada" (Figura 2.39(a)); "Plotar hidrograma resultante x Tabela de Precipitação"

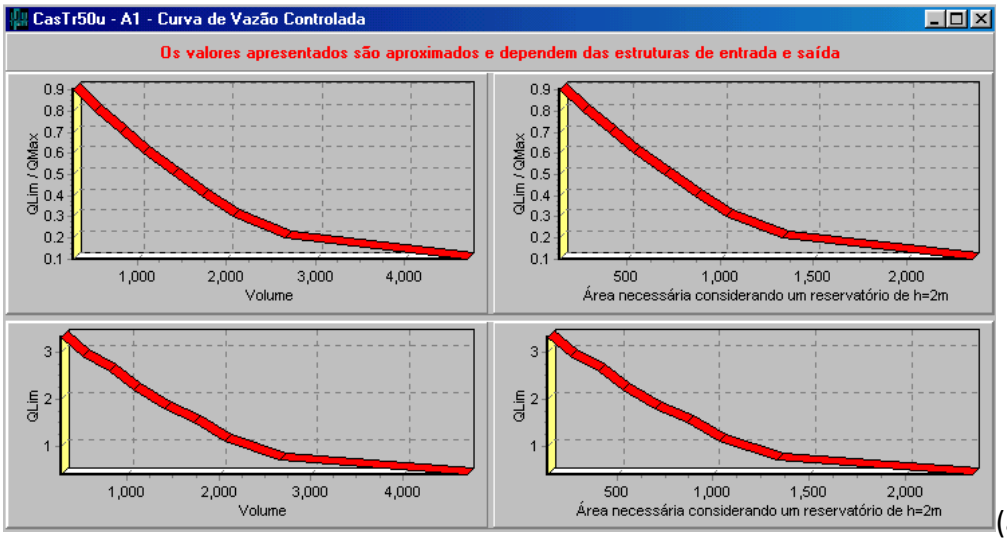
(Figura 2.39(b)); e “Plotar Tabela de Precipitação” (Figura 2.39(c)). Na Figura 2.39(b) e Figura 2.39(c), encontram-se os gráficos e à esquerda, em forma de planilha, os valores que lhes correspondem.

O gráfico e a planilha referentes à precipitação (Figura 2.39(c)), apresentam as perdas e a precipitação efetiva.

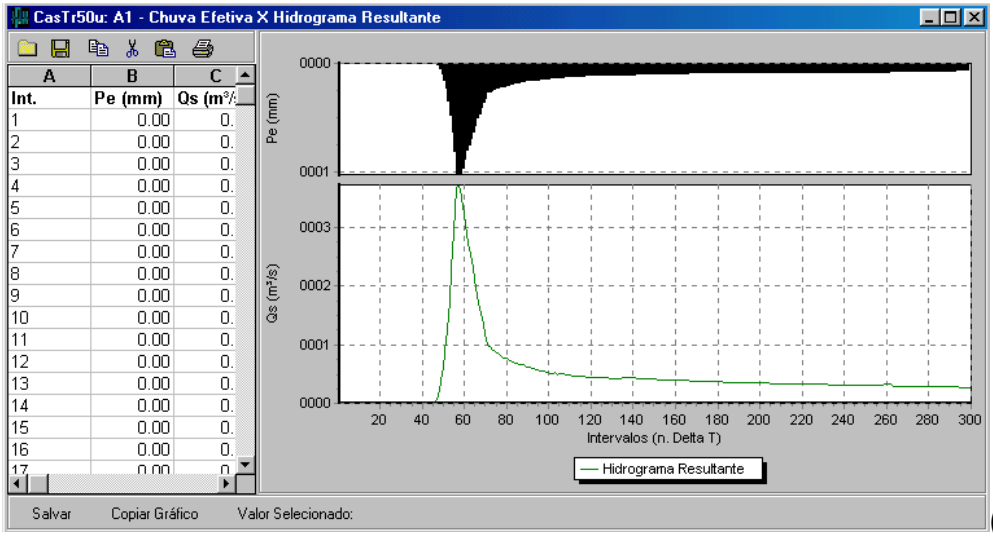
Neste gráfico, como em outros semelhantes que se seguem, existe algumas opção que possibilitam o controle da sua visualização e outras facilidades. Na parte superior, temos da esquerda para a direita, botões que permitem zoom mais, zoom menos, normal (reconstitui o tamanho original após uma ou mais operações de “zoom”); setas de deslocamento: à esquerda, para cima, para baixo e à direita; e, opções, onde existem diferentes possibilidades de edição de cabeçalhos, edição e ocultamento de linhas, de impressão, de cópia para a área de transferência e de salvar o gráfico para uso posterior. Na parte inferior do gráfico temos controle sobre a visualização 3D.

A planilha, por sua vez, permite a seleção de parte ou da totalidade de seus dados de forma trivial, selecionando-se uma célula e com o botão esquerdo do mouse pressionado arrastar-se o ponteiro até o extremo oposto do campo a ser selecionado. Opções de salvar e imprimir são acessíveis através de um menu suspenso que é aberto pressionando-se o botão direito do mouse com o apontador sobre a área da planilha.

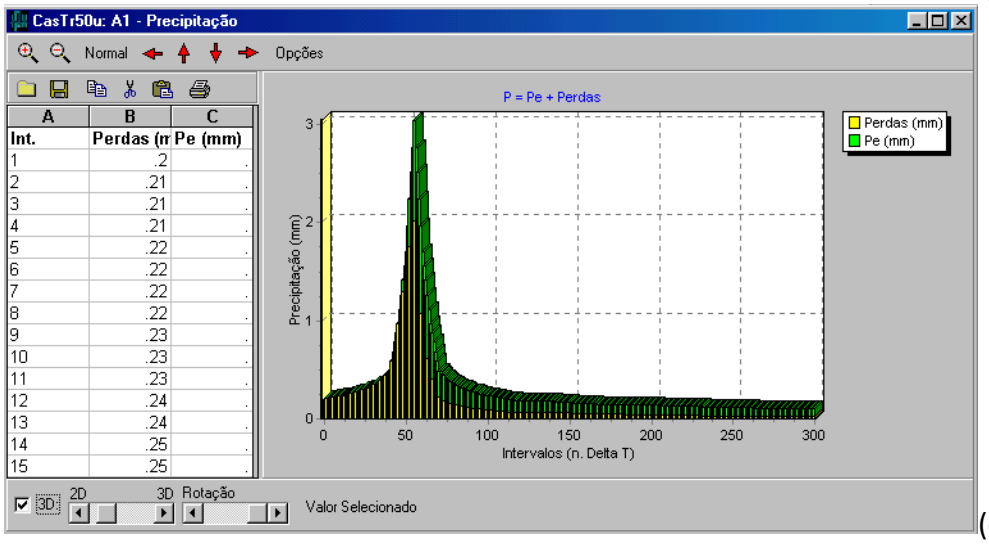
No caso específico do gráfico da Figura 2.39(c), em virtude de ser uma combinação de dois outros - um Hietograma e um Hidrograma - não são permitidas maiores edições. Entretanto, na parte inferior, existem as opções salvar, copiar gráfico (para a área de transferência do Windows) e valor selecionado - quando o ponteiro do mouse é colocado sobre o gráfico ou na planilha selecionando-se um valor com o pressionamento do botão esquerdo.


CasTr50u - A1 - Curva de Vazão Controlada
Os valores apresentados são aproximados e dependem das estruturas de entrada e saída
QLim / QMax
Volume
Área necessária considerando um reservatório de h=2m
QLim

(a)



(b)



(c)

Figura 2.39. Gráficos e Planilhas das sub-bacias.

Gráficos e Planilhas dos demais Objetos.

Conforme apresentado na Figura 2.38, os objetos *PC* e *Reservatório* dão acesso a dois tipos de hidrogramas: Hidrograma Resultante e Hidrogramas dos Objetos Conectados.

O gráfico Hidrograma dos Objetos Conectados (Figura 2.40) existe quando dois ou mais objetos estão conectados ao PC. Nestes casos, apresenta os hidrogramas de cada objeto conectado ao PC ou ao Reservatório e que serão somados através da *Operação Soma*.

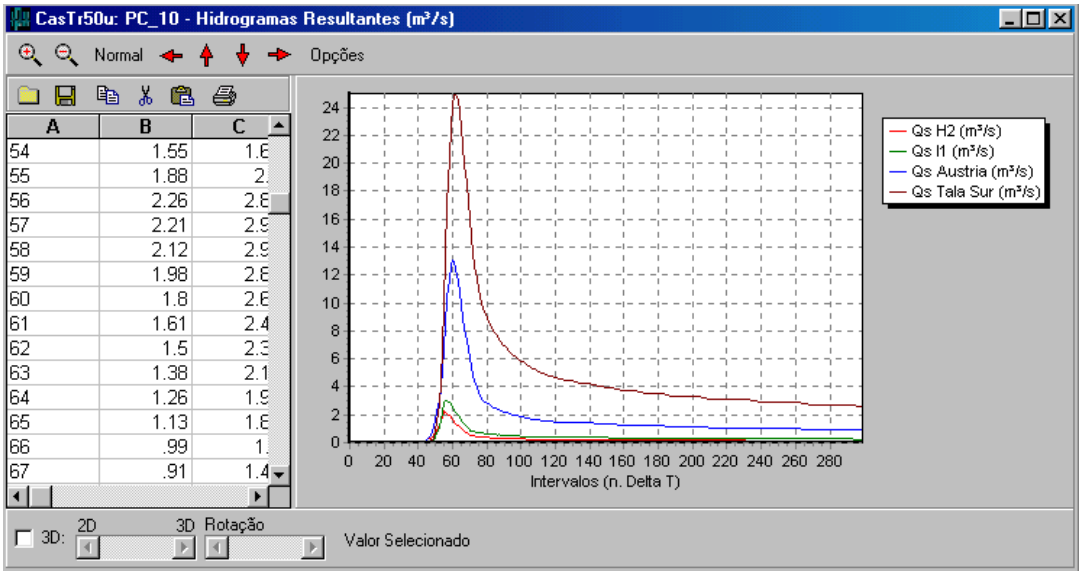


Figura 2.40. Hidrograma dos objetos conectados.

O gráfico Hidrograma Resultante (Figura 2.41) existente para todos os demais objetos corresponde, na verdade, a dois hidrogramas: o Hidrograma de Entrada e o Hidrograma de Saída do objeto. As planilhas ao lado contêm os valores que correspondem a cada hidrograma em cada intervalo de tempo. Na Figura 2.41 é possível ver uma parte da planilha tendo seus valores selecionados para que possam ser copiados através da *Área de Transferência do* Windows para outro aplicativo, como por exemplo, uma planilha ou um editor de textos.

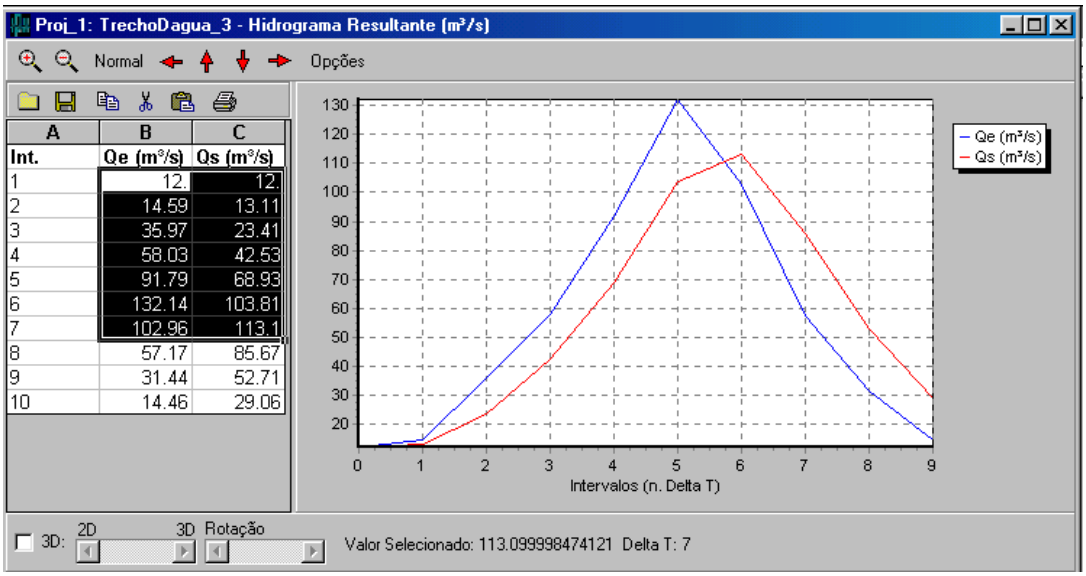


Figura 2.41. Hidrograma resultante.

Existe outra **opção de graficação ou de saída de resultados em planilhas**. Seu acesso é feito através do Menu Projeto e nele das opções: Plotar Hidrogramas Resultantes e Mostrar Hidrogramas Resultantes. Selecionando qualquer uma das opções o usuário terá acesso a uma janela como a ilustrada na Figura 2.42, e nela fará a seleção de quais objetos deseja ter seus hidrogramas de saída graficados ou apresentados na forma de planilha. A figura apresenta também o resultado dessas seleções.

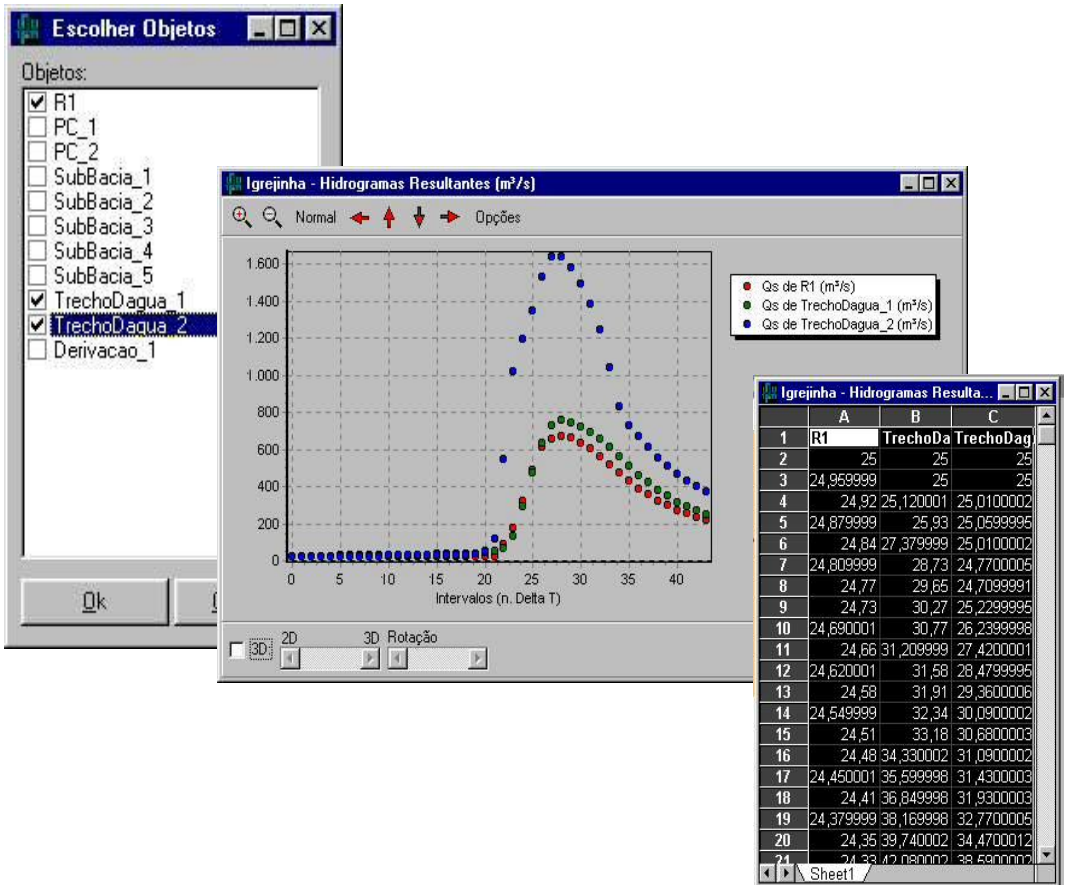


Figura 2.42. Acesso à graficação e apresentação em planilhas dos resultados de quaisquer operações hidrológicas selecionadas pelo usuário.

2.11.3 Documentação do projeto

A boa documentação de um projeto é o que garante a compreensão da sua estruturação, das hipóteses analisadas e das decisões tomadas durante o seu desenvolvimento e, depois, em qualquer época em que tenha de ser revisto. Dessa forma, os Memoriais Descritivos e de Cálculo são importantes de serem bem desenvolvidos.

O Editor de Textos do IPHS1 permite a edição desses documentos

3 MODELO SWMM - *STORM WATER MANAGEMENT MODEL*

3.1 Introdução

O *Storm Water Management Model* (modelo de gestão de águas pluviais, SWMM) da USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) é um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão, que pode ser usado para um único evento ou simulação contínua. O modelo permite simular tanto a qualidade quanto a quantidade da água escoada, especialmente de escoamentos em bacias urbanas. O *módulo de escoamento* ou *hidrológico* do SWMM funciona como uma série de bacias nas quais cai a água da chuva e se geram escoamentos. O *módulo de transporte* ou *hidráulico* analisa o percurso da água através do sistema composto de tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos reguladores. Além disso, o modelo tem a capacidade de acompanhar a evolução da quantidade e qualidade da água escoada em cada bacia, bem como a vazão, o nível de água nos poços ou a qualidade em cada tubulação e canal em uma simulação com duração de vários intervalos de tempo.

O SWMM foi desenvolvido em 1970, sendo melhorado desde então. A versão atual, que corresponde a 5ª versão do programa, é uma releitura completa da versão anterior. Rodando em sistema operacional Windows, o SWMM 5 fornece um ambiente integrado para editar entradas de dados da área de estudo, executando simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água, e apresentando os resultados em uma variedade de formatos. Essas visualizações incluem área de drenagem codificada em cores e mapas de sistemas de transporte, gráficos e tabelas de séries temporais, perfis de plotagem e análises de frequência estatística.

3.1.1 Características do modelo hidrológico

O modelo SWMM considera diversos processos hidrológicos que ocorrem no ciclo das águas urbanas. Estes incluem:

- Precipitação variada no tempo;
- Evaporação de águas superficiais não correntes;
- Acumulação e derretimento de neve;
- Interceptação de precipitações por armazenamento em depressões;
- Infiltração das precipitações em camadas de solo não saturadas;
- Aporte de águas infiltradas em aquíferos;
- Intercâmbio de fluxo entre o aquífero e o sistema de drenagem;
- Depósitos não lineares para o fluxo superficial.

A variabilidade espacial nestes processos é contemplada pela divisão de uma determinada área de estudo em áreas de captação de água pequenas e homogêneas, chamadas bacias de simulação. Cada uma destas bacias contém suas próprias frações de subáreas permeáveis e impermeáveis. O fluxo superficial pode ser gerado nas diferentes subáreas, entre as diferentes bacias hidrográficas, ou entre pontos de entrada no sistema de drenagem.

Paralelamente, o SWMM contém um conjunto flexível de ferramentas de modelagem das características hidráulicas utilizado para analisar o fluxo devido ao escoamento superficial e dos aportes externos de vazão através de uma rede de tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, e outras estruturas. Essas ferramentas são capazes de:

- Trabalhar com redes de tamanho ilimitado;
- Utilizar uma ampla variedade de geometria para os condutos, tanto fechados quanto abertos, bem como de canais naturais;

- Representar elementos especiais como unidades de armazenamento e tratamento, separadores de fluxo, bombas, vertedores e orifícios;
- Aplicar fluxos externos e concentrações para determinar a qualidade de águas superficiais, fluxo de vazão com os aquíferos, vazões de infiltração nos coletores pluviais, vazões sanitárias em tempo seco e aportes externos definidos pelo usuário;
- Realizar análise hidráulica por vários métodos, tais como fluxo uniforme, onda cinemática e modelagem completa de onda dinâmica;
- Modelar diferentes regimes de fluxo, tais como remanso, entrada em carga, fluxo inverso e acumulação em superfície;
- Programar controles dinâmicos especificados pelo usuário de forma a simular o funcionamento de bombas, abertura de orifícios e a posição da crista de um vertedor.

Além de modelar a geração e o transporte do escoamento superficial, o modelo SWMM também é capaz de estimar a produção e a evolução das cargas poluentes associadas ao escoamento superficial. Podem ser modelados os seguintes processos para qualquer número de substâncias associadas à qualidade de água definidas pelo usuário:

- Acumulação de contaminantes em períodos secos para diferentes usos do solo;
- Arraste de contaminantes em determinados usos do solo durante eventos de chuva;
- Contribuição direta devida à própria chuva;
- Redução da acumulação devida à limpeza de ruas em períodos secos;

- Redução em cargas de arraste em função do uso de BMPs1;
- Aporte de esgotos sanitários e outros aportes externos especificados pelo usuário em qualquer ponto do sistema de drenagem;
- Acompanhamento de substâncias associadas com a qualidade da água em todo o sistema;
- Redução da concentração do poluente através de tratamento em tanques ou devido a processos naturais em tubulações e canais.

Em função do escopo deste PDDU, não serão detalhadas as funções do modelo relacionadas à qualidade das águas.

3.1.2 Aplicações típicas do SWMM

Desde seu desenvolvimento, o SWMM tem sido usado em milhares de redes de evacuação tanto de águas residuais quanto de águas pluviais. Entre as aplicações típicas estão:

- Projeto e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para evitar inundações;
- Dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios correspondentes para o controle de inundações e proteção da qualidade das águas;
- Definição de zonas de inundação natural em rios e córregos;
- Projeto de estratégias de controlo para a rede, para minimizar o número de descargas de sistemas unitários;
- Avaliação do impacto do aporte e infiltração no sistema de descarga de águas residuais;

[1] Do inglês *Best Management Practices*, traduzem-se como Boas Práticas de Gestão.

- Gerar cargas de fontes de poluição não pontual para estudos de acumulação de poluentes;
- Avaliar a eficácia das BMPs para reduzir a carga poluente durante eventos de chuva.

3.1.3 Instalação do programa

A Versão 5 do SWMM foi projetada para funcionar em sistemas operacionais Windows 98/NT/ME/2000/XP, para computadores compatíveis com IBM/Intel. É distribuído como um único arquivo, **epaswmm5_setup.exe**, que contém um programa de instalação automática. Para instalar:

1. Selecione Executar a partir do Menu Iniciar do Windows;
2. Digite o caminho completo onde se localiza o arquivo **epaswmm5_setup.exe**, ou clique no botão Procurar... para localizar o arquivo em seu computador;
3. Pressione o botão OK para iniciar o processo de instalação.

O programa de instalação solicitará que informe a pasta onde pretende instalar o SWMM. A pasta padrão é **C: \ Program Files \ APE SWMM 5.0**. Após a instalação ser concluída, o Menu Iniciar terá uma nova opção chamada APE SWMM 5.0. Para iniciar o SWMM basta selecionar a guia e clicar na opção APE SWMM 5.0 que aparece no submenu correspondente (o nome do arquivo executável que inicia o SWMM no Windows é **epaswmm5.exe**).

Para desinstalar EPA SWMM do computados, deverá fazer o seguinte:

1. Selecione o Menu Iniciar do Windows;
2. Selecione **Painel de Controle** a partir do Menu Iniciar;
3. Dê um duplo clique em **Adicionar ou Remover Programas;**
4. Selecione **EPA SWMM 5.0** na lista de programas que aparecerá;

5. Clique no botão **Alterar/Remover.**

3.1.4 Passos de utilização do modelo

Geralmente, quando se roda o SWMM para modelar o escoamento sobre uma área de estudo os procedimentos acompanham os seguintes passos:

1. Especificar um conjunto de opções de trabalho e de propriedades dos objetos por padrão;
2. Desenhar uma representação gráfica dos objetos físicos do sistema a ser estudado;
3. Editar as propriedades dos objetos que compõem o sistema;
4. Selecionar o conjunto de opções para análise;
5. Executar a simulação;
6. Ver resultados da simulação.

Alternativamente, o usuário pode converter arquivos de dados correspondentes a versões anteriores do SWMM em lugar dos passos 1 a 4 descritos anteriormente.

3.2 Modelo conceitual utilizado pelo SWMM

Este item descreve como o SWMM modela objetos e parâmetros operacionais de um sistema de drenagem de águas pluviais. Detalhes sobre como inserir informações no programa serão descritos em itens posteriores.

É apresentada neste item também uma visão geral dos fundamentos de cálculo computacional utilizados pelo SWMM para simular os fenômenos hidrológicos e hidráulicos de um sistema de drenagem.

O SWMM representa o comportamento de um sistema de drenagem através de uma série de fluxos de água e matéria entre os principais módulos constituintes de

uma análise ambiental. Estes módulos e respectivos objetos no programa são os seguintes:

- O Módulo Atmosférico, a partir do qual são analisados a precipitação e os contaminantes depositados na superfície do solo, considerados no Módulo de Superfície do Solo. O SWMM utiliza o objeto ***Rain Gage*** (pluviômetro) para representar as entradas nos sistema.
- Módulo de Superfície do Solo, o qual é representado através de um ou mais objetos ***Subcatchment*** (sub-bacia). Estes objetos recebem a precipitação do Módulo Atmosférico em forma de chuva ou neve e geram saídas em forma de infiltração, para o Módulo de Águas Subterrâneas, e também como escoamento superficial e cargas de contaminantes, para o Módulo de Transporte.
- O Módulo de Águas Subterrâneas recebe a infiltração do Módulo de Superfície do Solo e transfere uma parte desta como fluxo de entrada para o Módulo de Transporte. Este módulo se modela utilizando os objetos ***Aquifers*** (Aquíferos).
- O Módulo de Transporte contém uma rede com elementos de transporte (canais, tubulações, bombas e elementos de controle) e unidades de amortecimento e tratamento que propagam a água até os nós exutórios ou estações de tratamento. Os fluxos de entrada deste módulo podem ser oriundos do escoamento superficial, de interação com o fluxo subterrâneo, das vazões sanitárias correspondentes a períodos sem chuva, ou de hidrogramas de entrada definidos pelo usuário. Os componentes do Módulo de Transporte são modelados com os objetos ***Node*** (Nó) e ***Link*** (Linha).

Em uma modelagem no SWMM não é necessário que figurem todos os módulos descritos.

3.2.1 Componentes físicos (*Visual Objects*)

A Figura apresenta os componentes físicos que podem ocorrer em um sistema de drenagem pluvial. Estes componentes ou objetos, descritos a seguir, podem ser representados no mapa do SWMM.

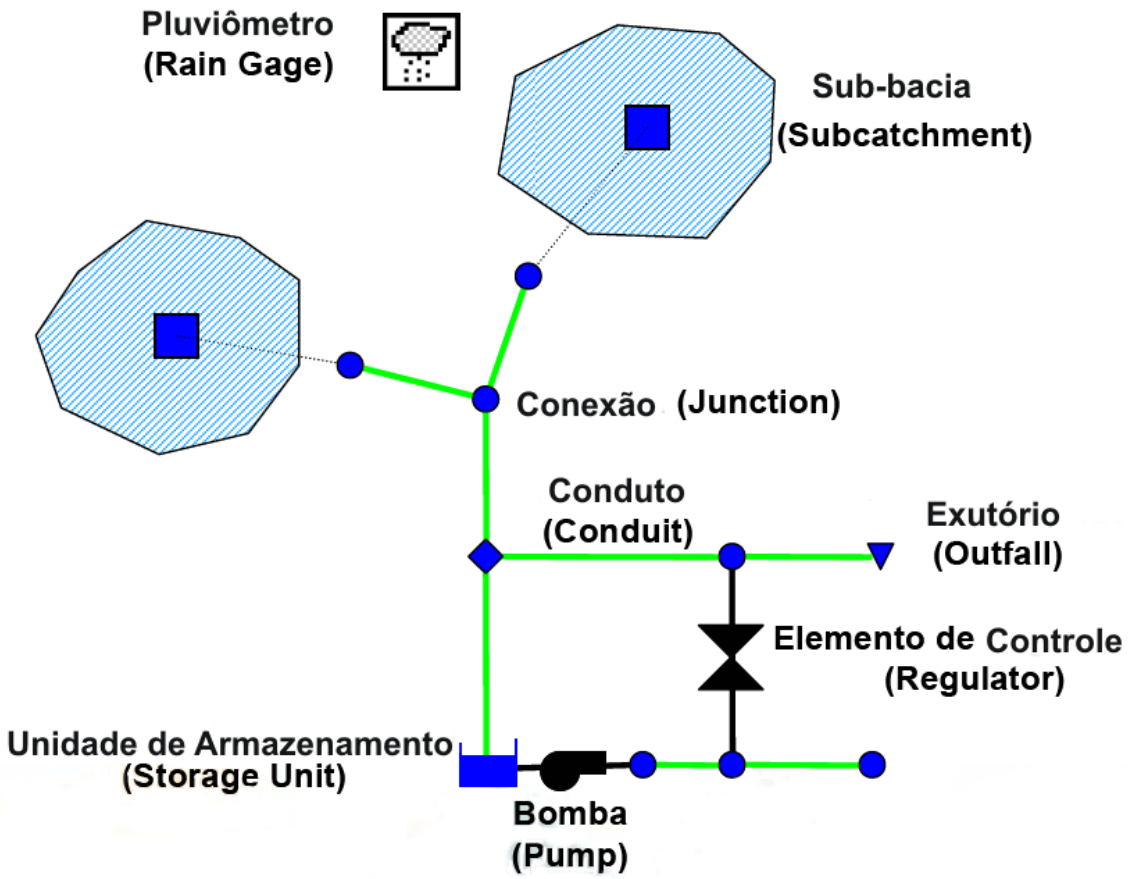


Figura 3.1. Exemplo dos componentes físicos empregados na modelagem de um sistema de drenagem.

Pluviômetro (*Rain Gage*)

Os Pluviômetros fornecem os dados de entrada de precipitação que ocorre sobre uma ou mais bacias definidas na área de estudo. Os dados de chuva podem ser definidos pelo usuário através de séries temporais ou de um arquivo externo ao programa. O SWMM tem diferentes formatos de arquivos de dados de chuva, bem

como um formato padrão definido pelo usuário. As propriedades principais de entrada de um pluviômetro são:

- Tipo de dados de chuva (Por exemplo: intensidade da precipitação, volume ou volume acumulado);
- Intervalo de tempo dos dados;
- Origem dos dados de chuva (indicando se de uma série temporal ou de um arquivo externo);
- Nome de origem dos dados de chuva.

Sub-bacias (*Subcatchments*)

As sub-bacias são unidades hidrológicas do espaço cuja topografia e elementos do sistema de drenagem conduzem o escoamento diretamente até um ponto de descarga (*outlet*). O usuário do programa deve dividir a área de estudo em um número adequado de bacias e identificar o ponto de descarga de cada uma delas. Os pontos de saída de cada uma das bacias hidrográficas podem ser tanto nós (*nude*) do sistema de drenagem quanto outras sub-bacias

As sub-bacias podem ser divididas em áreas permeáveis e impermeáveis. O escoamento superficial pode infiltrar na camada superior do terreno das subáreas permeáveis, mas não através das subáreas impermeáveis. As subáreas impermeáveis, por sua vez, podem ser divididas em duas: aquela que contempla o armazenamento em depressões e a que não contempla. O fluxo de escoamento de uma subárea da bacia pode fluir para outra subárea, ou as subáreas podem drenar diretamente para a saída da sub-bacia.

A infiltração nas áreas permeáveis de uma determinada bacia na camada superior não saturada do solo pode ser descrita por três modelos:

Modelo de infiltração de Horton;

Modelo de Infiltração de Green-Ampt;

Modelo de infiltração baseado no CN (curva número) do SCS.

Para modelar o fluxo de águas subterrâneas entre o aquífero e um nó do sistema de drenagem é necessário estabelecer parâmetros de Águas Subterrâneas (*Groundwater parameters*) da sub-bacia. A acumulação e o aporte de poluentes das bacias podem ser associados aos usos do solo (*Land uses*) determinados para a sub-bacia.

Os parâmetros de entrada restantes são:

- Pluviômetro escolhido;
- Nó ou sub-bacia onde descarregada a sub-bacia representada;
- Usos do solo;
- Áreas e superfícies tributárias;
- Percentual de impermeabilização;
- Declividade da bacia;
- Largura característica do fluxo superficial;
- Valor do coeficiente de Manning n para áreas superficiais permeáveis e impermeáveis;
- Armazenamento em depressões para áreas superficiais permeáveis e impermeáveis;
- Percentual de solo impermeável sem armazenamento em depressões.

Nós de conexão

As conexões são nós do sistema de drenagem onde se conectam várias linhas entre si. Fisicamente estes nós podem representar confluência de cursos d'água superficiais naturais, poços de visita do sistema de drenagem, ou elementos de conexão de canalizações. Os aportes externos de vazão entram no sistema através

destas conexões. O excesso de água em um nó resulta em um fluxo parcialmente pressurizado enquanto os condutos conectados encontram-se em carga. Esse excesso pode ser perdido do sistema ou sair pela parte superior e posteriormente voltar a entrar na conexão.

Os principais parâmetros de entrada de uma conexão são:

- Cota inferior ou do fundo do poço que pode ser encontrado na conexão;
- Profundidade do poço;
- Área superficial da região alagada quando ocorre alguma inundação. É um parâmetro opcional de entrada;
- Dados de aportes externos de vazão. Trata-se de outro dado opcional.

Exutório (*outfall node*)

Os exutórios são nós terminais de um sistema de drenagem utilizados para definir as condições de contorno finais de jusante do sistema no caso da utilização do modelo de fluxo da onda dinâmica (*Dynamic Wave*). Para outros tipos de escoamento, os exutórios comportam-se como conexões. Uma restrição do modelo é que só é possível conectar uma linha a um nó exutório.

As condições de contorno de um exutório podem ser descritas através das seguintes relações:

- A profundidade crítica ou a profundidade uniforme na conexão com o conduto;
- Um nível de água fixo;
- A variação de marés, representada por diferentes níveis da mesma ao longo do dia;
- Uma série temporal que represente o nível d'água no ponto de descarga ao longo do tempo.

Os principais parâmetros são:

- Cota de fundo;
- Descrição de tipo e estado da condição de contorno;
- Presença de uma válvula de comporta (*flat valve*) para prevenir o fluxo inverso a partir do nó exutório.

Divisores de fluxo

Os divisores de fluxo são nós do sistema de transporte utilizados para dividir o escoamento em dois canais de saída, definido pelo usuário. Estes divisores de vazão só podem ter dois condutos para descarga. Estão ativos somente quando se analisa o fenômeno através do modelo da onda cinemática (*kinematic wave*), sendo tratados como simples nós quando utilizado o modelo de onda dinâmica (*Dynamic Wave*). Existem quatro tipos de divisores definidos a partir do modo como repartem a vazão de entrada:

Divisor de corte (*Cutoff Divider*): deriva todas as vazões de entrada acima de um determinado valor de corte especificado.

Divisor de excesso (*Overflow Divider*): deriva todas as vazões de entrada acima da capacidade do conduto não-derivado.

Divisor tabular (*Tabular Divider*): utiliza uma tabela definida pelo usuário para expressar a relação entre a vazão derivada em função da vazão total de entrada.

Vertedor (*Weir Divider*): utiliza a equação característica de um vertedor para derivar a vazão de entrada. A vazão derivada através de um vertedor é calculada pela equação:

$$Q_{div} = C_w \cdot (f \cdot H_w)^{1,5} \quad (3.1)$$

Onde Q_w é a vazão derivada, C_w é o coeficiente do vertedor, H_w é a altura d'água no vertedor e f é um fator calculado pela expressão:

$$f = \frac{Q_{in} - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (3.2)$$

Onde Q_{in} é a vazão de entrada no divisor, Q_{min} é a vazão a partir da qual começa a divisão de vazões e Q_{max} é calculada por:

$$Q_{max} = C_w \cdot H_w^{1,5} \quad (3.3)$$

Os parâmetros especificados pelo usuário para determinar um divisor do tipo vertedoe são Q_{min}, H_w e C_w.

Os principais parâmetros de entrada para um divisor são:

- Os mesmos dados necessários para representar uma conexão, conforme indicados anteriormente;
- O nome da linha que recebe as vazões derivadas;
- O método empregado para calcular a quantidade de vazão derivada.

Unidades de armazenamento

As unidades de armazenamento são nós do sistema de drenagem com capacidade de armazenar certos volumes de água. Fisicamente eles podem representar desde pequenos sistemas, como reduzidas bacias, até sistemas grandes, como lagos. As propriedades volumétricas de um sistema de armazenamento são representadas por uma tabela ou uma função que indica a superfície de armazenamento em função da cota do mesmo. Os principais parâmetros de entrada são:

- Cota de fundo;
- Altura máxima do amortecimento;
- Tabela de dados que relaciona a superfície de armazenamento em função da cota;
- A evaporação proporcional produzida na unidade de amortecimento;

- Área de armazenamento da água quando ocorre inundação. Trata-se de um parâmetro opcional, dependente da ativação ou não da opção ***Allow Ponding*** (permitir inundação).
- Dados de aporte externo de vazões, também opcional.

Condutos

Os condutos são as tubulações ou canais por onde se propaga o escoamento entre os nós do sistema de transporte. É possível selecionar a seção transversal de várias geometrias, abertas ou fechadas, definidas no programa. Também permite definir áreas de seção transversal irregular, permitindo representar canais naturais.

O SWMM utiliza a equação de Manning para estabelecer a relação entre vazão no conduto (Q), seção transversal (A), raio hidráulico (R_h) e declividade (S), tanto para canais abertos quanto para condutos fechados parcialmente cheios. A equação de Manning em unidades do S.I. é dada por:

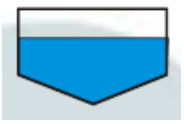
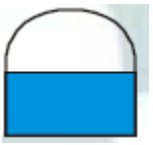
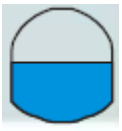
$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot \sqrt{S} \qquad (3.4)$$

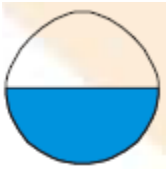
Onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning. No caso do escoamento uniforme (*Steady Flow*) e para o caso de análise através da Onda Cinemática (*kinematic Wave*), S é considerado como a declividade do conduto. No caso de empregar o modelo da Onda Dinâmica (*Dynamic Wave*) é considerado como a declividade hidráulica do escoamento (ou seja, o decréscimo por unidade de comprimento). Os principais parâmetros de entrada dos condutos são:

- Nome dos nós de entrada e saída;
- Altura do conduto em relação ao nível do plano dos nós inicial e final;
- Comprimento do trecho;
- Coeficiente de Manning;
- Geometria da seção transversal do conduto (Quadro 3.1);

- Coeficiente de perdas da entrada e saída do conduto;
- Existência de válvula *flap* para prevenir o fluxo inverso.

Quadro 3.1. Diferentes seções transversais de condutos disponíveis.

NOME	PARÂMETROS	FORMA	NOME	PARÂMETROS	FORMA
Circular	Profundidade		Circular preenchida	Profundidade, profundidade do preenchimento	
Retangular fechada	Profundidade, largura		Retangular aberta	Profundidade, largura	
Trapezoidal	Profundidade, largura da base, inclinação dos lados		Triangular	Profundidade, largura superior	
Elipse horizontal	Profundidade, largura máxima		Elipse vertical	Profundidade, largura máxima	
Arco	Profundidade, largura máxima		Parabólica	Profundidade, largura superior	
Potencial	Profundidade, largura superior, expoente		Retangular triangular	Profundidade, largura superior, altura do triângulo	
Retangular arredondada	Profundidade, largura superior, raio do fundo		Cesta de mão modificada	Profundidade, largura	
Oval	Profundidade		Ferradura	Profundidade	

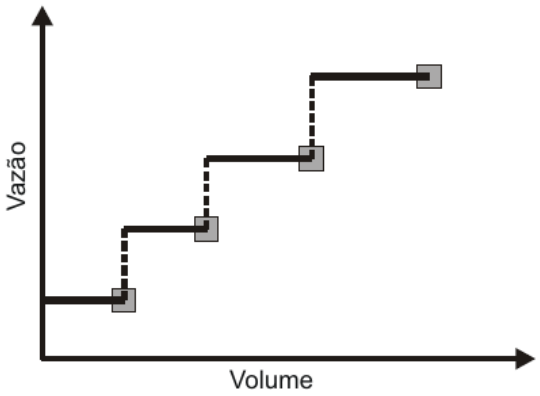
NOME	PARÂMETROS	FORMA	NOME	PARÂMETROS	FORMA
Gótico	Profundidade		Catenária	Profundidade	
Semi-elíptica	Profundidade		Cesta de mão	Profundidade	
Semicircular	Profundidade				

Bombas (*Pumps*)

As bombas consistem em elementos na linha do sistema de drenagem que servem para elevar a água. São representadas no modelo por linhas dotadas de sua curva característica. A curva da bomba descreve a relação entre a vazão na bomba e as consuções de contorno nos nós de entreda e saída da mesma. São quatro diferentes formas de representar o comportamento de uma bomba:

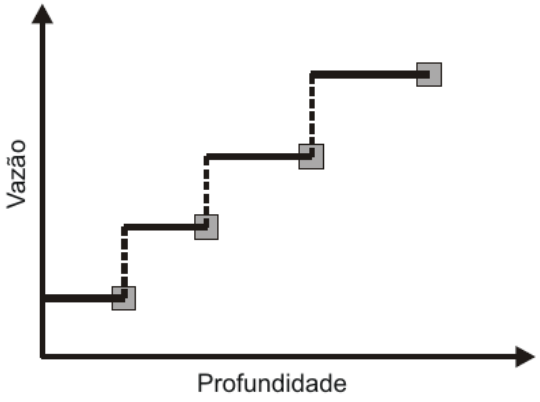
Tipo I

Bomba instalada off-line. A bomba aspira água de um poço de sucção de forma que a vazão aumenta em função do volume de água disponível no poço.



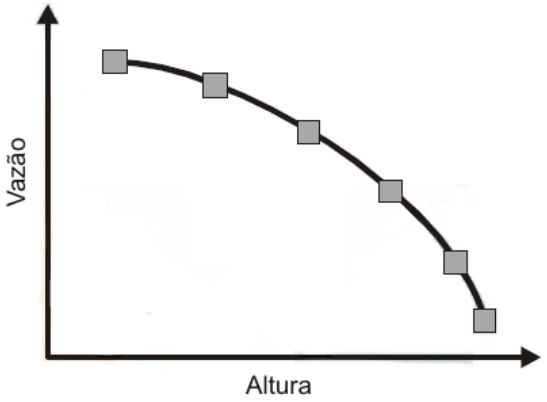
Tipo II

Bomba on-line com o sistema, onde a vazão aumenta em função da profundidade da água (nível) no nó de entrada (aspiração).



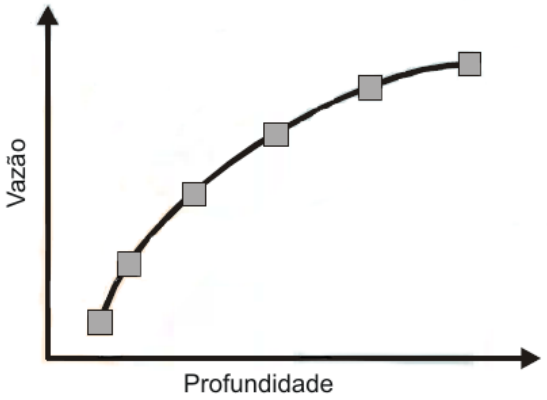
Tipo III

Bomba on-line com o sistema, onde a vazão varia de forma contínua com a diferença de altura entre os nós de entrada e saída. Sua representação é a curva característica de uma bomba.



Tipo IV

Bomba de velocidade variável instalada on-line com o sistema de forma que a vazão varia de forma contínua com a profundidade da água (nível) no nó de entrada (aspiração).



O acionamento e desligamento das bombas pode ser controlado dinamicamente através de regras de controle (*Control Rules*) definidas pelo usuário.

Os principais parâmetros de entrada de uma bomba são:

- Nomes dos nós de entrada e de saída;

- Nome da curva que representa o comportamento da bomba;
- Estado inicial da bomba (ligada ou desligada).

Reguladores de vazão (*Flow Regulators*)

São estruturas ou dispositivos utilizados para controlar e derivar as vazões dentro do sistema de tranporte do escoamento. Fisicamente são implantadas para:

- Controlar as emissões das unidades de armazenamento;
- Prevenir fenômenos de entrada em carga inaceitáveis para os condutos;
- Derivação de vazões para tratamento em sistemas de interceptação.

Os elementos reguladores de vazão podem ser os seguintes:

- Orifícios (*Orifices*),
- Verteduros (*Weirs*),
- Descargas(*Outlets*).

Orifícios (*Orifices*)

São empregados para modelar descargas e estruturas de derivação no sistema de drenagem. Estes elementos normalmente são aberturas nas paredes dos poços de visita, sistemas de armazenamento ou comportas de controle. São representados no SWMM como um alinha que conecta dois nós. Um orifício pode ter forma circular ou retangular, estar localizado na parte superior ou no nó de montante do conduto e, eventualmente contar com uma válvula flap para prevenir o fluxo inverso.

Os orifícios podem ser usados como descarga das unidades de armazenamento em qualquer dos modelos hidráulicos contemplados no programa. A menos que estes elementos estejam vinculados a um nó com unidade de armazenamento, este tipo de elemento só pode ser implantado no sistema de drenagem quando se utiliza o modelo hidráulico da Onda Dinâmica (*Dynamic Wave*).

O fluxo através de um orifício é dado por:

$$Q = C \cdot A\sqrt{2gh} \quad (3.5)$$

Onde Q é a vazão, C é o coeficiente de descarga, A é a seção do orifício, g é a aceleração da gravidade e h é a diferença de níveis entre montante e jusante do orifício. A área de abertura do orifício pode ser controlada dinamicamente através de regras de controle (*Control Rules*) definidas pelo usuário.

Os principais parâmetros de entrada de um orifício são:

- Nomes dos nós de entrada e de saída;
- Configuração, definindo se o orifício encontra-se na parte superior ou lateral;
- Forma do orifício;
- Altura do orifício sobre a cota de fundo do nó;
- Coeficiente de descarga.

Vertedores (*Weirs*)

Assim como os orifícios servem para modelar descargas e estruturas de separação no sistema de drenagem. Normalmente são localizados nos poços de visita, ao longo de um dos lados dos condutos ou canais, ou nas unidades de armazenamento. São representados no SWMM como uma linha que conecta dois nós, e o vertedor é situado no nó de montante, podendo eventualmente contar com uma válvula flap para prevenir o fluxo inverso. O SWMM contempla quatro tipos de vertedores, cujas equações de vazão são mostradas no Quadro 3.2.

Os vertedores podem ser usados como descarga das unidades de armazenamento em qualquer dos modelos hidráulicos contemplados no programa. A menos que estes elementos estejam vinculados a um nó com unidade de armazenamento, este tipo de elemento só pode ser implantado no sistema de drenagem quando se utiliza o modelo hidráulico da Onda Dinâmica (*Dynamic Wave*).

Quadro 3.2. Diferentes tipos de vertedores disponíveis.

TIPO	FORMA DA SEÇÃO	EQUAÇÃO
Transversal (*transverse*)	Retangular	$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2}$
Descarga lateral (*Side flow*)	Retangular	$Q = C_w \cdot L \cdot h^{5/3}$
Em V (*V-noch*)	Triangular	$Q = C_w \cdot S \cdot h^{5/2}$
Trapezoidal	Trapezoidal	$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2} + C_{ws} \cdot S \cdot h^{5/2}$
Cw = coeficiente de descarga do vertedor, L = largura do vertedor, S = inclinação do lado do vertedor em V e trapezoidal, h = diferença de alturas no vertedor, Cws = coeficiente de descarga através dos lados de um vertedor trapezoidal.		

A altura da crista do vertedor em relação a cota de fundo do nó de entrada pode ser controlada dinamicamente através de regras de controle (*Control Rules*) definidas pelo usuário. Este aspecto distinto pode ser usado para representar barramentos infláveis.

Os principais parâmetros de entrada de um vertedor são:

- Nomes dos nós de entrada e de saída;
- Forma e geometria;
- Altura da crista do vertedor em relação a cota de fundo do nó de entrada;
- Coeficiente de descarga.

Descargas (*outlets*)

São dispositivos de controle de vazão implantados de forma habitual para controlar vazões de descarga em unidades de armazenamento. São implantados para modelar sistemas com relações especiais entre altura e a vazão de descarga que não podem ser caracterizadas através de bombas, orifícios e vertedores. São representados no SWMM como uma linha que conecta dois nós. Também pode contar com uma válvula flap para prevenir o fluxo em uma das direções.

As descargas podem ser usadas nas unidades de armazenamento em qualquer dos modelos hidráulicos contemplados no programa. Caso estes elementos não estejam vinculados a um nó com unidade de armazenamento, só podem ser implantados no sistema de drenagem quando se utiliza o modelo hidráulico da Onda Dinâmica (*Dynamic Wave*).

O fluxo através da descarga segue uma tabela definida pelo usuário que estipula a vazão em função da diferenças de altura sobre ela.

Os principais parâmetros de entrada de uma descarga são:

- Nomes dos nós de entrada e de saída;
- Altura em relação a cota de fundo do nó de entrada;
- Função ao tabela que relaciona a altura e a vazão descarregada.

Rótulos do Mapa (*Mapa Labels*)

Os rótulos ou etiquetas do mapa são textos opcionais que podem ser adicionados ao mapa de trabalho do SWMM para indicar objetos ou regiões do mapa. As etiquetas podem ser editadas e arrastadas para qualquer posição no mapa.

3.2.2 Objetos virtuais (sem representação gráfica)

Além dos objetos físicos que podem ser visualizados no mapa de trabalho, o SWMM utiliza as seguintes categorias de objetos virtuais para descrever cada processo, bem como características adicionais dentro de uma área de estudo.

Dentre os objetos virtuais dos SWMM encontram-se dados sobre climatologia (temperatura, evaporação, velocidade do vento, desgelo de neve, redução da área de neve), objetos de modelagem de neve (*Snow Packs*), modelagem de aquíferos, hidrogramas unitários, seções transversais, aportes externos de vazão (*External Inflows*), regras de controle (*Control Rules*), agentes contaminantes (*Pollutants*), usos do solo (*Land Uses*), tratamento (*Tratament*), curvas (*Curves*), séries temporais de dados (*Serie temporal*) e padrões de tempo (*Time Pattern*). A maioria destes objetos

virtuais não tem relação ao contexto de drenagem urbana deste manual e, por isso, não serão detalhados aqui. Para maiores informações sobre os objetos aqui não considerados, consultar a versão completa do manual original do EPA SWMM. A seguir são descritos os objetos relevantes neste contexto.

Hidrogramas Unitários

Os hidrogramas unitários (UHs) são utilizados para estimar as infiltrações e entradas de vazão nos condutos em função da precipitação (RDII). Um hidrograma unitário pode conter até três destes hidrogramas, com respostas a curto, médio e longo prazo. Um grupo de UHs pode conter até 12 hidrogramas unitários diferentes, um para cada mês do ano. Cada conjunto de hidrogramas unitários são considerados como um objeto individual no SWMM, ao qual se designa um único nome indicativo da chuva que contém os dados de precipitação necessários.

Cada hidrograma unitário é definido por três parâmetros (Figura 3.2):

R: fração do volume de chuva que ingressa na rede de drenagem;

T: tempo transcorrido do início da chuva ao valor máximo do hidrograma unitário, em horas;

K: relação entre o momento onde as vazões são nulas e o tempo que demora para ocorrer o valor máximo.

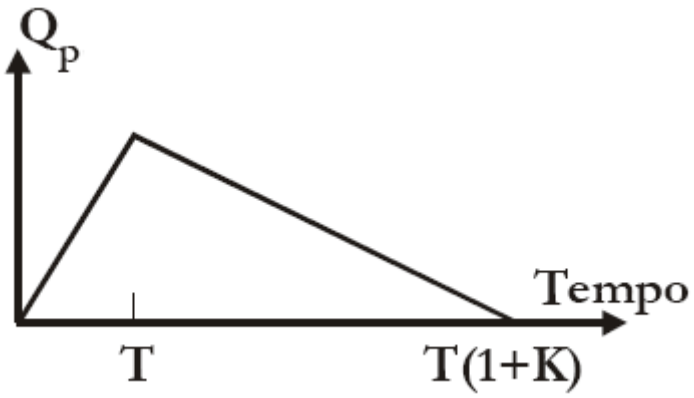


Figura 3.2. Hidrograma unitário de geração de RDII.

Para gerar uma vazão RDII em um nó do sistema de drenagem, o nó deve identificar (através da propriedade *Inflows*) o grupode hidrogramas unitários e a área de infiltração da parte que contribui para a vazão RDII. Uma alternativa ao emprego do hidrograma unitário pode ser criar um arquivo RDII externo contendo uma série de dados temporais desse fenômeno.

Seções transversais

Referem-se a dados geométricos que descreve como varia a cota de fundo do conduto ou canal em função da largura ao longo de uma seção transversal de um canal natural ou conduto de seção irregular. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de seção transversal de um canal natural.

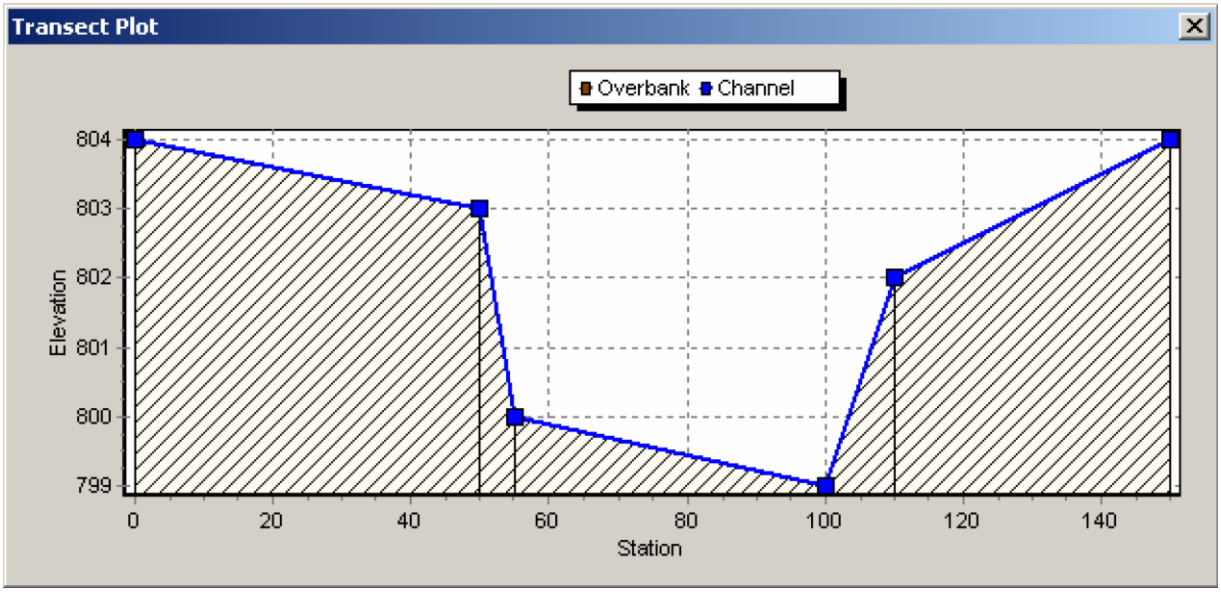


Figura 3.3. Exemplo de seção transversal de um canal natural.

Cada seção deverá possuir um nome próprio para identificação para que possa ser referenciada ao conduto cuja forma seja representada por esta seção. Para a edição deste tipo de seção existe um Editor de Seções Transversais (*Transect Editor*) que permite introduzir dados de cota de cada um dos pontos definidos na seção. O SWMM internamente converte estes dados em tabelas de área, largura da parte

superior e raio hidráulico em função da profundidade do canal. Além disso, cada seção pode ter uma seção lateral cujo coeficiente de rugosidade pode ser diferente do canal principal. Isto permite realizar estimativas mais realistas de transporte em canais em condições de cheia (utilização de planície de inundação, por exemplo).

Aportes externos de vazão (*External Inflows*)

Além das entradas de vazão provenientes do escoamento e das águas subterrâneas das sub-bacias, os nós do sistema de drenagem podem receber outros três tipos de aportes externos de vazão: aportes diretos (*Direct Inflows*), séries temporais de vazão que entram diretamente no nó definido pelo usuário; vazões de período seco (*Dry Weather Inflows*), representam vazões de contribuição de esgotos na rede pluvial, através de uma vazão de referência, como uma vazão de entrada média ajustada de forma periódica (mensalmente, diariamente ou de hora em hora) através da aplicação de um padrão de tempo (*Time Pattern*), e; entradas e infiltrações relacionadas com as chuvas (*Rainfall-Derived Infiltration Inflow RDII*) que consistem nas vazões provenientes das águas de chuva que aportam diretamente às conexões e poços de visita, nos conectores de bombas, assim como a infiltração de águas subsuperficiais através de rachaduras nos condutos, fugas nas conexões e em poços de visitas, e baseiam nos hidrogramas unitários descritos anteriormente.

Séries temporais de dados (*Serie Temporal*)

São objetos definidos no SWMM para descrever determinadas propriedades de algusn dos objetos de projeto que variam ao longo do tempo. Podem ser utilizadas para introduzir:

- Dados de temperatura;
- Dados de evaporação;
- Dados de chuva;
- Dados de nível em nós de descarga;

- Hidrogramas externos de entrada de vazão ao sistema de drenagem através dos nós;
- Polutogramas externos de entrada ao sistema de drenagem através dos nós.

Cada série temporal de dados deve ter um nome indicativo que deve ser único dentro de um mesmo projeto do SWMM. A cada uma destas curvas se pode designar quandos dados se deseje. O tempo pode ser especificado, quer em termos de horas, desde o início da simulação, quer como uma referência absoluta para uma data e hora específicas.

3.2.3 Métodos computacionais

O SWMM é um modelo de simulação baseado em fenômenos físicos que utiliza uma solução discreta no tempo do fenômeno, com base nos princípios de conservação de massa, energia e da quantidade de movimento sempre que possível. Neste item serão descritos brevemente os métodos utilizados pelo SWMM para modelar a quantidade do escoamento de origem pluvial ao longo dos seguintes processos físicos:

- Escoamento superficial;
- Infiltração;
- Comportamento hidráulico do sistema;
- Inundações na superfície do terreno.

Escoamento superficial

A visão conceitual do escoamento utilizado pelo SWMM é apresentado na figura. Cada uma das sub-bacias é tratada como um reservatório não linear. Os aportes de vazão provém da precipitação e de qualquer outra sub-bacia situada a montante. Existem diversas vazões de saída: infiltração, evaporação, escoamento superficial. A capacidade deste reservatório é o valor máximo de um parâmetro denominado armazenamento em depressão, que corresponde ao máximo

armazenamento na superfície devido a inundação do terreno, a capacidade de absorção da camada superficial do solo e a interceptação nas irregularidades do terreno. A vazão superficial por unidade de área Q se produz somente quando a profundidade de água deste “depósito” excede o valor do máximo armazenamento em depressão, dp, cuja vazão de saída é obtida pela equação de Manning. A profundidade de água na sub-bacia (d expresso em metros) é atualizada continuamente a cada um dos instantes de cálculo (com tempo expresso em segundos) através da resolução numérica do balanço hídrico na sub-bacia.

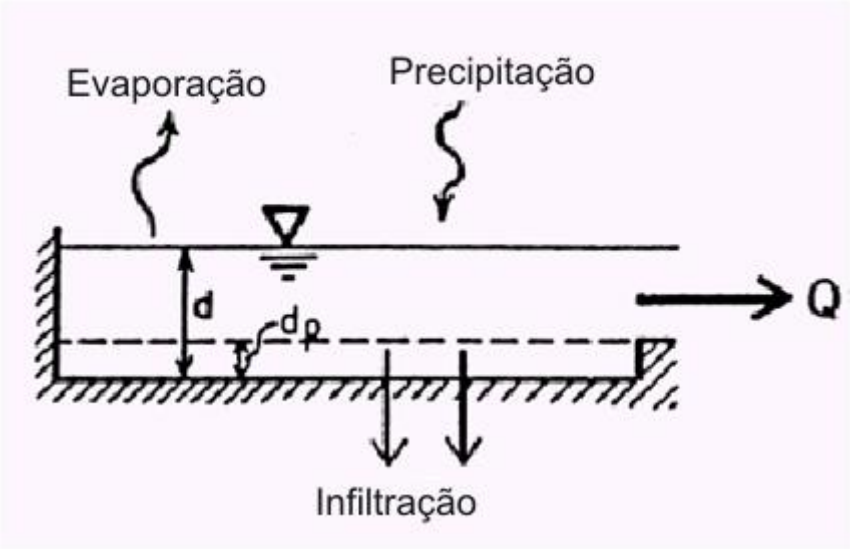


Figura 3.4. Visão conceitual do escoamento no SWMM.

Infiltração

fenômeno pelo qual a água da chuva penetra pela superfície do terreno dos solos não saturados e das áreas permeáveis da bacia. O SWMM permite selecionar três modelos diferentes de infiltração.

Equação de Horton: este método se baseia em observações empíricas e propõe que a infiltração decresce exponencialmente desde um valor inicial máximo até um certo valor mínimo, ao longo do evento de chuva. Os parâmetros de entrada

necessários para este modelo são de infiltração máxima e mínima, o coeficiente de decaimento que descreve quão rápido se dá a diminuição da infiltração ao longo do tempo, e o tempo necessário para saturar completamente um solo que inicialmente estava totalmente seco.

Método de Green-Ampt: este método considera a existência de uma franja drenante no solo que separa o solo com um determinado conteúdo inicial de umidade do solo completamente saturado na parte superior. Os parâmetros necessários são o valor de déficit inicial de umidade do solo, sua condutividade hidráulica e a altura de sucção da franja drenante.

Método do CN: é uma aproximação adotada a partir do CN do método SCS para estimar o escoamento, apresentado no Capítulo 1 deste manual. Assume-se que a capacidade total de infiltração de um solo pode ser extraída de uma tabela de Curva Número. Durante um evento de chuva esta capacidade é representada como uma função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração restante. Os parâmetros de entrada para este método são o CN, a condutividade hidráulica do solo (utilizada para estimar um tempo de separação mínimo entre os diferentes eventos de chuva) e o tempo que leva o solo para atingir a saturação completa estando inicialmente completamente seco.

Modelo hidráulico de transporte (*Flow Routing*)

A propagação do escoamento através da rede de drenagem de quaisquer condutos no SWMM está baseada nas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento tanto para o escoamento gradualmente variado quanto para o transitório (a saber, as equações de Saint Venant). O usuário pode selecionar o nivel de sofisticação em que se deseja resolver estas equações, de cordo com um dos modelos hidráulicos de transporte descritos abaixo.

Escoamento uniforme (*Steady State Routing*): Este modelo consiste na forma mais simples de representar o comportamento da água no interior de condutos. Para

isso, assume-se que em cada um dos interbvalos de tempo de cálculo o escoamento é uniforme. Desta forma o modelo simplesmente translada os hidrogramas de entrada no nó de montante do conduto até o nó final do mesmo conduto, com um certo retardo e muda o seu aspecto. Para relacionar a vazão com a área e a profundidade no conduto é utilizada a equação de Manning.

Este tipo de modelo hidráulico não consegue levar em conta armazenamentos de água que ocorrem nos condutos, fenômenos de ressalto hidráulico, perdas nas entradas e saídas dos poços de visita, fluxo inverso (efeitos de remanso), ou escoamento sob pressão. Só pode ser empregados em sistemas ramificados, onde cada bnó possui uma única linha para onde correm suas águas (amenos que o nó seja um divisor, o que requer duas tubulações de saída). Este modelo é insensível ao intervalo de tempo selecionado , sendo apropriado apenas para análises preliminares utilizando simulações contínuas em grandes escalas temporais.

Modelo da Onda Cinemática (*Kinematic Wave*): Este modelo resolve a equação da continuidade junto com uma forma simplificada da equação de quantidade de movimento em cada um dos condutos. Este última equação requer que a declividade da linha da água seja igual a declividade de fundo do conduto ou canal.

A vazão máxima que pode escoar pelo conduto é a vazão a seção plena determinada pela equação de Manning. Qualquer acréscimo de vazão a este valor no nó de entrada do conduto se perde do sistema, bem como pode permanecer parado na parte superior do nó de entrada e entrar posteriomente no sistema, quando a capacidade do conduto permitir.

O modelo da onda cinemática permite que tanto a vazão quanto a área variem especial e temporalmente no interior do conduto. Isto origina uma certa atenuação e retardo nos hidrogramas de saída em relação às vazões de entrada nos condutos. No entanto, este modelo não consegue representar efeitos como ressalto hidráulico, perdas nas entradas e saídas dos poços de visita, fluxo inverso (efeitos de remanso),

ou escoamento sob pressão, bem como sua aplicação está restrita a redes ramificadas. Geralmente pode manter estabilidade numérica adequada com incrementos de tempo de cálculo relativamente grandes, da ordem de 5 a 15 min

Se alguns dos efeitos acima mencionados não são apresentados no sistema ou não são significativos, o modelo da onda cinemática é uma alternativa suficientemente precisa e eficiente para modelar o transporte com tempos de simulação longos.

Modelo da Onda Dinâmica (*Dynamic Wave*): este modelo resolve as equações completas unidimensionais de Saint Venant e, portanto, gera os resultados mais precisos. Estas equações representam a aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e da continuidade dos volumes nos nós.

Com este modelo é possível representar o escoamento sob pressão quando um conduto fechado se encontra completamente cheio, de modo que a vazão que escoa pelo mesmo pode exceder a capacidade da tubulação completamente cheia determinada por Manning. As inundações ocorrem quando a profundidade (nível) de água nos nós excede o valor máximo disponível neles. Esse excesso de vazão pode perder-se ou gerar um acúmulo na parte superior do nó, voltando a entrar no sistema de drenagem posteriormente.

Este modelo contempla os efeitos de ressalto hidráulico, perdas nas entradas e saídas dos poços de visita, fluxo inverso (efeitos de remanso), ou escoamento sob pressão. Visto que resolve de forma simultânea os valores dos níveis de água nos nós e as vazões nos condutos pode ser aplicado a qualquer tipo de configuração de rede, incluindo casos que contenham nós com multiplos divisores de escoamento para jusante do mesmo. Trata-se do método adequado para os sistemas em que os efeitos de ressalto hidráulico, originados pelas restrições do escoamento para jusante e pela presença de elementos de controle, tais como orifícios e vertedores. Em compensação, para utilizar esse método são necessários incrementos de tempo de

cálculo muito menores, da ordem de 1 minuto ou menos. Durante a simulação, o SWMM reduzirá automaticamente o intervalo de tempo de cálculo máximo definido pelo usuário se for necessário para manter a estabilidade de cálculo da análise.

Inundações na superfície do terreno (*Surface Ponding*)

Normalmente, nos modelos de transporte, quando a vazão em um dos poços de visita do sistema excede a capacidade máxima do sistema de transporte situado a jusante, o excesso de água no sistema geralmente se perde. Uma opção que o programa apresenta consiste em armazenar esse excesso de volume acima do nó, em forma de armazenamento ou estancamento da água, retornando novamente ao sistema quando a capacidade da rede permitir. Nos modelos de Escoamento Uniforme e da Onda Cinemática, a água parada simplesmente é armazenada como um excesso de volume. No caso da Onda Dinâmica, que está condicionado aos níveis de água nos nós, esse excesso de volume manifestação como uma inundação acima dos nós com uma área superficial constante. Esta área superficial é um parâmetro de entrada inserido no nó.

Em vez disso, o usuário pode desejar representar o fluxo que ocorre na superfície de forma explícita. No caso de canais abertos isto pode significar inundação de estradas, túneis e pontes, assim como o surgimento de novas áreas de armazenamento por inundação. Em sistemas fechados, as inundações ocorrem nas ruas e becos mais baixos do sistema. Podem também fluir para acumular-se em depressões, como em áreas de estacionamento, porões e simulares.

4 EQUIPE TÉCNICA E DE APOIO

4.1 Governo do Distrito Federal – GDF

Governador: José Roberto Arruda

4.2 Secretaria de Estado de Obras

Secretário de Obras: Márcio Machado

Secretário Adjunto: Jaime Alarcão

Subsecretário de projetos de engenharia: Dalmo Rebello Silveira

Subsecretário de acompanhamento, controle e fiscalização de obras: Mauricio Canovas Segura

Subsecretária de gerenciamento de programas de obras: Renilda Teixeira Vieira Toscanelli

Diretoria da Unidade de Administração Geral - UAG: Paulo Olivieri

Assessoria Jurídica: Henrique Bernardes

4.3 Equipe de coordenação e apoio da contratante

Secretaria de Estado de Obras: Edson José Vieira, Patrícia Marc Cristianne de Menezes Milhomem

ADASA: Paulo Guimarães Júnior, Carlos Francisco Pena Ribeiro

NOVACAP: Vanessa Figueiredo M. de Freitas, Cláudio Márcio Lopes Siqueira

4.4 Concremat Engenharia

Coordenador: Celso S. Queiroz

Especialista em Drenagem Urbana: Daniel G. Allasia P.

Especialista em Drenagem Urbana: Wanda Morales Alonso Zeveri

Especialista em Meio Ambiente: Lidiane Souza Gonçalves

Especialista em Meio Ambiente: Antônio Cosme D'Elia

Especialista em Geologia e Geotécnica: Elidiane Oliveira Martins

Especialista em Geologia e Geotécnica: Hiromiti Nakao

Especialista em Planejamento da Drenagem: Carlos Tucci

Especialista em Recursos Hídricos: José Carlos Rosa

Especialista em Planejamento: André Bragança

Gerenciamento Administrativo: Guaracy Klein

Apoio Administrativo: Gontran Thiago Tibery Lima Maluf

5 BIBLIOGRAFIA

BUREAU OF RECLAMATION-1960-"Diseño de pequeñas presas",US Dep of Interior, USA.

CLARK, C.0.-1945-"Storage and the unit hydrograph"-ASCE, Vol. 110, pp-1416-1446.

CUNGE, J. A.-1969-"On the subject of a flood propagation computation method(Muskingum Method)", Jou. of Hyd. Res.,pag. 205-230.

DOOGE, James C.I.-1973-"Linear theory of hydraulie systems", Technical Bulletin N° 1468, Agricultural Research Service, Dep. of Agriculture, USA.

FLEMING, George-1975-"Computer simulation techniques in hydrology", American Elsevier Publishing Co.,Inc., NY, USA.

GERMANO, A. O.; TUCCI, C.E.M. 1995. Variabilidade do parâmetro CN em bacias urbanas brasileiras. In: XI Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos E Ii Simpósio De Hidráulica Dos Países De Língua Oficial Portuguesa. Anais. Recife, v1,p. 177-182, nov. 1995.

HOLTAN,H.N.-1961-"A concept of infiltration estimates in watershed engineering",USDA/Agricultural Research Service, USA.

HOLTAN, H.N. and N.C. LCPEZ-1971-"USDAHL-70 Model of watershed hydrology"-Washington, DC, a techn. Bulletin N 1435, Agricultural Research Service, USA.

HORTON, R. E. -1939- "Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity", Trans. Am. Geoph. Union, par IV, pp.693.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER-1973-"HEC-1 Flood Hydrograph package-User Manual",U.S. Army, Corps of Engineers.

.JONES, S.B.-1981-"Choice of space and time steps in the Muskingum-Cunge flood routing method",Proc. Instn. Civil Eng. part 1, pag 759-772, USA.

MCCARTHY, G. T.-1940-"The unit hydrograph and flood routing",U.S. Engineers School, Fort Belvoir, Virginia.

MILLER W. A., CUNGE, J. A. -1975- "Simplified equations of unsteady flow", capitulo 8 de "Unsteady flow in open channelo", editado por MAHMOOD K. e V.

MINE, M. R. M. *Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias*. Tese de doutorado. IPH-UFRGS. 1998.

YEVJEVICH, V. *Water Resources Publications*, Fort Collins, Colorado, USA.

NASH, J.E. *The form of the Instantaneous Unit Hydrograph.* IASH: Assemblé Generale de Toronto, Tome III, pp.114-121. 1957.

PONCE, M. V. & YEVJEVICH, V. *Muskingum-Cunge*. 1978.

TUCCI, C.E.M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH/UFRGS. 1998. 669p.